

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Danijel Drezga

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

prof.dr.sc. Zdravko Schauperl

Danijel Drezga

Zagreb, 2009.

Sadržaj

Sadržaj	2
Tekst završnog rada	5
Sažetak	6
Izjava	7
Popis slika, tabela i kratica	8
Popis slika	8
Popis tabela	10
Popis kratica	11
Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina	12
1 Uvod	13
2. Teorija kompozitnih materijala	14
2.1 Polimerni kompoziti (PMC)	14
2.2 Vrste opterećenja	16
Vlačna naprezanja	16
Tlačna naprezanja	17
Smična naprezanja	17
Savojna naprezanja	17
2.3 Usporedba sa ostalim konstrukcijskim materijalima	18
2.4 Matrice	21
Mehanička svojstva matrice	21
Adhezijska svojstva matrice	22
Svojstva žilavosti matrice	22
Eksploatacijska svojstva matrice	22
Vrste materijala matrice kompozita	23
Epoksidne smole	24
Geliranje i skrućivanje	24
Usporedba svojstava materijala matrice	25
Adhezijska svojstva	25
Mehanička svojstva	25
Otpornost stvaranju mikro-pukotina	26
Otpornost na umor materijala	27
Otpornost na prodiranje medija	27

Sažetak i pregled svojstava materijala matrica	29
2.5 Ojačala.....	30
Svojstva vlakana	30
Osnovna mehanička svojstva vlakana	31
Mehanička svojstva laminata	31
Vrste materijala vlakana	32
Staklena vlakna.....	32
Aramidna vlakna	33
Ugljična vlakna	33
Usporedba svojstava materijala vlakana.....	34
Usporedba cijena materijala vlakana	35
Vrste tkanina i raspored vlakana	35
Unidirekcijske (jednosmjerne) tkanine.....	35
0°/90°	36
Tkanja	36
Šivana tkanja 0/90°	38
Hibridne tkanine	38
3. Proizvodni procesi	39
Naštrcavanje (Spray Lay –up proces)	39
Ručno laminiranje u otvoreni kalup (Wet Lay-up/Hand Lay-up proces)	41
Vakuumiranje (Vacuum Bagging proces)	42
Ubrizgavanje smole u kalup (Resin Transfer Moulding (RTM) proces)	44
Ubrizgavanje smole u otvoreni kalup podpomognuto vakuumom (Vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM)).....	45
4. Spajanja kompozitnih laminata.....	47
5. Mehanička svojstva kompozitnih laminata.....	49
Uvod	49
Mezomehanička svojstva.....	50
Mehanika loma	50
Modus I test.....	51
6. Izrada uzoraka i ispitivanje	52
Specifikacije.....	52
Priprema i izrada uzoraka	54
Problemi s izradom uzoraka	60

Ispitivanja uzoraka	61
Ispitivanje uzorka bez prethodno šivanih slojeva [E1_N]	63
Ispitivanje uzorka sa prethodno šivanim slojevima [E1_S]	64
Izgled uzoraka nakon ispitivanja	65
7. Zaključak	66
8. Literatura	67



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Povjerenstvo za završne i diplomske radove
Studij STROJARSTVO
Inženjerstvo materijala



Zagreb, 13. studeni 2008.

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Danijel Drezga**

Mat. br.: 0035149985

Naslov: **OJAČANJE KOMPOZITNOG LAMINATA ŠIVANJEM SLOJEVA**

Opis zadatka:

U izradi proizvoda iz kompozitnih materijala najveći problemi a time i najlošija mehanička svojstva se javljaju na mjestima spojeva. Postoje načini na koje se taj utjecaj spajanja na svojstva kompozita nastoji smanjiti, a jedna od mogućnosti je i šivanje slojeva prije impregniranja. U ovom radu potrebno je ispitati utjecaj šivanja slojeva na čvrstoću spoja polimernog kompozita.

U tu svrhu potrebno je:

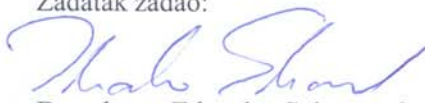
- proučiti literaturu i opisati primjenu šivanja u izradi kompozitnih materijala
- odabrati materijal i izraditi uzorke za laboratorijska ispitivanja uzoraka
- laboratorijski ispitati uzorke

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

26. studenog 2008.


Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Zdravko Schauperl

Krajnji rok predaje rada:

Studeni 2009.

Predsjednik povjerenstva


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac PDS/DS - 3

Sažetak

Kako se najlošija mehanička svojstva kompozitnih materijala javljaju u eksploataciji na mjestima spojeva, postoje različiti načini kako bi se taj utjecaj spajanja na svojstva nastojao smanjiti. Jedan od načina je šivanje slojeva prije impregniranja te isti danas pljeni veliku pažnju. Ovaj rad posvećen je proučavanu literature i opisu primjene ove danas nove tehnologije u izradi kompozita i poboljšanju eksploatacijskih svojstava. Obradena je teorija kompozitnih laminata uz detaljan prikaz vrste materijala matrica i ojačala te njihovih svojstava. Naglasak je stavljen na polimerne kompozitne materijale te njihovu usporedbu sa ostalim konstrukcijskim materijalima. Nadalje su opisani proizvodni postupci za izradu laminata i različitih izradaka od kompozitnih materijala te vrste spajanja istih. U sklopu rada, izrađeni su i uzorci koji su podvrgnuti eksperimentalnom laboratorijskom ispitivanju.

Izjava

Izjavljujem da sam ja – student **Danijel Drezga** – rođen 24. 05. 1984. u Zagrebu, JMBG 2405984330038, matični broj 0035149985, upisan u VII semestar akademske godine 2008/09. – radio ovaj rad samostalno sa znanjem stečenim tijekom obrazovanja uz nadzor mentora Prof.dr.sc. Zdravka Schauperla.

Također bih se zahvalio svima za veliku i nesebičnu pomoć.



Danijel Drezga

Popis slika, tabela i kratica

Popis slika

Slika 1 Svojstva materijala matrice, vlakna i kompozita u cjelini [1].....	15
Slika 2 Vlačno naprezanje kompozitnog laminata [1]	16
Slika 3 Tlačno naprezanje kompozitnog laminata [1]	17
Slika 4 Smično naprezanje kompozitnog laminata [1]	17
Slika 5 Savojno naprezanje kompozitnog laminata [1]	17
Slika 6 Vlačne čvrstoće pojedinih konstrukcijskih materijala [1]	18
Slika 7 Moduli elastičnosti pojedinih konstrukcijskih materijala [1]	19
Slika 8 Gustoće pojedinih konstrukcijskih materijala [1]	19
Slika 9 Specifična čvrstoća konstrukcijskih materijala [1]	20
Slika 10 Svojstva materijala [1].....	21
Slika 11 Svojstva materijala vlakana i matrice [1].....	22
Slika 12 Usporedba vlačne čvrstoće [1], Slika 13 Usporedba vlačnog modula [1]	25
Slika 14 Vlačno opterećenje kompozitnog laminata [1]	26
Slika 15 Usporedba svojstava materijala matrica [1].....	27
Slika 16 Svojstva kompozitnih laminata nakon uranjanja u vodu pri 100°C [1]	28
Slika 17 Svojstva laminata od unidirekcijskog preprega; a) vlačna, b) tlačna [1]..	32
Slika 18 Prosječne cijene materijala vlakana [1].....	35
Slika 19 Spray Lay-up proces.....	39
Slika 20 Wet Lay-up/Hand Lay-up proces	41
Slika 21 Vacuum Bagging proces.....	42
Slika 22 RTM proces	44
Slika 23 VARTM proces	45
Slika 24 Propagiranje pukotine a) Modus I, b) Modus II, c) Modus III [2]	50
Slika 25 DCB uzorak po ASTM D 5528-01 standardu [2].....	51
Slika 26 Skica uzoraka bez šivanja slojeva [2]	53
Slika 27 Skica uzoraka sa prethodnim uzdužnim šivanjem slojeva [2].....	53
Slika 28 Skica uzorka sa prihvatom u alat kidalice [3]	53
Slika 29 Uzorak tkanine korištene u izradi uzoraka [1].....	54
Slika 30 Priprema površine za laminiranje uzoraka.....	55

Slika 31 Vaganje i zamješavanje smole	55
Slika 32 Podstavljanje abrajz tkanine	56
Slika 33 Laminiranje prvog sloja	56
Slika 34 Odvajanje slojeva aluminijskom folijom	57
Slika 35 Laminiranje prošivenog dijela slojeva	57
Slika 36 Zatvaranje laminata bez prethodnog šivanja slojeva i vakuumiranje	58
Slika 37 Zatvaranje laminata sa prethodnog šivanim slojevima i vakuumiranje ...	58
Slika 38 Vakuum pumpa – 150 mbar (85% vakuum)	58
Slika 39 Ocrtavanje uzoraka bez prethodnog šivanja slojeva	59
Slika 40 Ocrtavanje uzoraka sa prethodnim šivanjem slojeva.....	59
Slika 41 Ljepljenje zglobnog prihvata u čeljusti kidalice	60
Slika 42 Skica statičkog vlačnog opterećenja uzorka [1]	61
Slika 43 Uzorci nakon ispitivanja (prednja strana).....	65
Slika 44 Uzorci nakon ispitivanja (stražnja strana)	65

Popis tabela

Tabela 1 Pregled svojstava mterijala matrice	29
Tabela 2 Pregled svojstava materijala ojačala	31
Tabela 3 Usporedba svojstava materijala ojačala	34
Tabela 4 Pregled izgleda i svojstava tkanja materijala ojačala.....	37
Tabela 5 Usporedba svojstava tkanja materijala ojačala.....	38
Tabela 6 Rezultati ispitivanja uzoraka	62

Popis kratica

PMC – Polimer Composite – Polimerni kompozit

FRP – Fibre Reinforced Composite – Vlaknima ojačan kompozit

MMC – Metal Matrix Composite – Metalni kompozit

CMC – Ceramic Matrix Composite – Keramički kompozit

FVF – Fibre Volume Fraction – Volumni udio vlakana

ILSS – Interlaminar Shear Strength – Interlaminarna smična čvrstoća

HS – High Strength – Visoka čvrstoća

IM – Intermediate Strenght – Srednja čvrstoća

HM – High Modulus – Visoki modul

UHM – Ultra High Modulus – Ultravisoki modul

RTM – Resin Transfer Moulding – Kalupljenje prijenosom smole

VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – Kalupljenje projenosom smole podpomognutim vakuumom

DCB – Double Cantilever Beam – Dupla konzolna greda

PE - Polietilen

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

F_p /[N] – prekidna sila

Δ /[mm] - produljenje

1 Uvod

Za potpuno shvaćanje uloge i primjene kompozitnih materijala kao strukturnih elemenata konstrukcije, potrebno je razumijevanje njih samih u smislu njihove proizvodnje. Kompozitni materijali u velikoj mjeri koriste se kao sekundarni materijali u izradi konstrukcija. Povećana krutost i manja masa, rezultat su sve veće primjene kompozitnih materijala u izradi strukturnih elemenata konstrukcija zamjenjujući materijale kao što je primjerice aluminij. Ovo je postalo moguće uslijed opsežnih istraživanja složenog ponašanja kompozitnih materijala izloženih opterećenju.

U izradi konstrukcija od kompozitnih materijala karakteristični problemi koji se javljaju a s time i loša mehanička svojstva su spajanja strukturnih elemenata. Na mjestima spajanja strukturnih elemenata u kompozitnim konstrukcijama uslijed visokog poprečnog opterećenja ili udaraca dolazi do pojave delaminacije. U tom slučaju, međusobni odnos matrice i vlakana slojeva kompozita ima veliku ulogu u prevenciji delaminacije kako matrica nosi velik dio opterećenja.

Konvencionalni spojevi metalnih strukturnih elemenata kao što su grede, konzole, rebra i slično sa ostalim dijelovima konstrukcije, obično su izvedeni uporabom zakovica ili vijaka. Metali su izotropni materijali podložni značajnijoj plastičnoj deformaciji nego kompozitni materijali, dok mehanička svojstva kompozitnih materijala daleko ovise o orijentaciji vlakana i rasporedu slojeva. Stoga su kompozitni materijali osjetljivi a time i problematični za spajanja konvencionalnim metodama. Ono čemu se danas teži je „idealna kompozitna konstrukcija“ tj., monolitna kompozitna konstrukcija bez spojeva.

Ovaj rad opisuje osnove kompozitnih materijala, njihove karakteristike, svojstva materijala od kojih su građeni te proizvodne tehnologije potrebne za konverziju materijala u gotovu kompozitnu strukturu. Poseban dio posvećen je problemima spajanja kompozitnih strukturnih elemenata u konstrukciju.

2. Teorija kompozitnih materijala

U svojoj osnovnoj formi, kompozitni materijal je onaj, sastavljen od najmanje dva različita materijala čija su svojstva bitno različita od onih koje posjeduju sami za sebe. U praksi, većina kompozita sastoji se od osnovnog materijala ili matrice te ojačala u obliku vlakana ili čestica čiji je zadatak povećanje čvrstoće i krutosti matrice koja ih objedinjuje. Danas, uobičajeni sintetski kompoziti mogu se podijeliti u tri osnovne grupe:

Polimerni kompoziti (PMC) – se najčešće koriste te su detaljnije razrađeni u nastavku. Također su poznati pod nazivom „FRP“ (Fibre Reinforced Polymers) – ovi kompozitni materijali koriste matricu baziranu na duromernim polimerima i različitim vrstama vlakana (staklena, aramidna i ugljična) kao ojačalima.

Metalni kompozitni (MMC) – sve više se mogu pronaći u automobilske industriji, ovi materijali koriste metal kao matricu (npr. aluminij) sa vlaknima proizvedenim od npr. SiC (silicijev karbid) kao ojačalima.

Keramički kompoziti (CMC) – koriste se u visokotemperaturnim okolinama, ovi kompoziti koriste keramičke materijale kao matricu te vrlo kratka vlakna kao ojačala proizvedena od npr. SiC i BN (borov nitrid).

2.1 Polimerni kompoziti (PMC)

Duromeri sastava na bazi epoksidnih i poliesterskih smola imaju ograničenu uporabu za proizvodnju konstrukcija i njihovih dijelova, jer njihova mehanička svojstva nisu dovoljno dobra u usporedbi sa većinom metala. Dakako, imaju poželjna svojstva posebice zbog njihove sposobnosti oblikovanja u složenu geometriju (oblik).

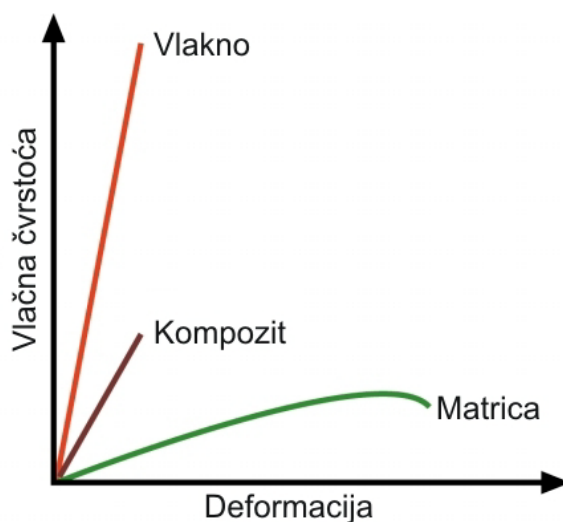
Materijali kao što su staklo, aramid i bor posjeduju ekstremno visoke vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće no u „krutom obliku“ povećanje geometrije ta svojstva su narušena. Činjenica je da uslijed opterećenja ovih materijala većih dimenzija, površinske i druge nesavršenosti propagiraju te stvaraju pukotine za koje je posljedica lom materijala koji nastaje ispod R_m . Kako bi se ova pojava nadvladala,

materijal se proizvodi u obliku vlakana, čime se pojava loma zbog nesavršenosti svodi na manji broj vlakana a time se zadržava čvrstoća materijala.

Iznimna svojstva materijala dobiti će se kombinacijom matrice (duromer) i ojačala najčešće u obliku staklenih, aramidnih ili ugljičnih vlakana, gdje je zadaća matrice; prenošenje opterećenja na vlakna, odvajanje vlakana jednih od drugih u svrhu sprječavanja širenja pukotine u materijalu, formiranje kompozitne konstrukcije te zaštita kompozitne konstrukcije od utjecaja okoline.

Visoka čvrstoća i krutost, jednostavnost izrade zahtjevne geometrije oblika, visoka otpornost na utjecaje iz okoline spregnuto sa malom masom, čini kompozitnim materijal superiorniji nad metalnim materijalima u različitim primjenama.

Kako polimerni kompoziti objedinjuju matricu i ojačalo, svojstva kompozitnog materijala objediniti će tako dio svojstava matrice i ojačala.



Slika 1 Svojstva materijala matrice, vlakna i kompozita u cjelini [1]

Svojstva kompozita određena su:

- Svojstvima vlakna
- Svojstvima matrice
- Volumnim udjelom vlakana u matrici (FVF)
- Geometrijom i orijentacijom vlakana u matrici

O prva dva svojstva detaljnije će se u nastavku pisati. Volumni udio vlakana uglavnom je definiran tehnologijama izrade kojima se vlakna impregniraju matricom u kompozit o kojima će u nastavku rada biti riječ. Dakako, ovisit će i o vrsti duromera (smole) i formi (raspored) vlakana u matrici. Općenito, kako su mehanička svojstva vlakana bolja od onih matrice, veći volumni udio vlakana u kompozitu rezultirati će boljim svojstvima samog kompozita i obrnuto. U praksi postoje granice kako je potrebno da vlakna budu svom površinom impregnirana matricom. U protivnome, prilikom proizvodnje tj. impregniranja većeg volumena vlakana matricom mogu se pojaviti nesavršenosti i uključci zraka što će narušiti svojstva kompozita a time biti koncentracije naprezanja koje kasnije mogu izazvati lom kompozita. Maksimalni volumni udio vlakana u matrici uz „optimalna“ svojstva iznosi <70%.

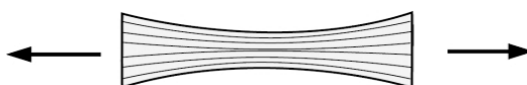
Važno je napomenuti da kod metala, svojstva materijala daleko ovise proizvođaču/dobavljaču, te osoba koja proizvodi gotovu konstrukciju nema mogućnost promjene svojstava materijala tijekom proizvodnje. Međutim, kompozitni materijal i njegova svojstva formiraju se istodobno sa procesom proizvodnje, što će reći, da osoba koja proizvodi konstrukciju sama kreira svojstva kompozitnog materijala koji će biti ili je dio konstrukcije. Dakako da je ta faza od krucijalne važnosti kod formiranja i proizvodnje gotove kompozitne konstrukcije i na to treba staviti poseban naglasak.

2.2 Vrste opterećenja

Postoje četiri vrste izravnih opterećenja koja svaki materijal mora podnijeti u eksploataciji kao što su; vlačna, tlačna, smična i savojna, te posebno, raslojavanje.

Vlačna naprezanja

Slika 2 prikazuje vlačno opterećenje kompozita. Odziv kompozita na vlačno opterećenje zavisi o svojstvima vlačne čvrstoće i krutosti vlakana, koja su znatno bolja od svojstava matrice.



Slika 2 Vlačno naprezanje kompozitnog laminata [1]

Tlačna naprezanja

Slika 3 prikazuje kompozit izložen tlačnom opterećenju. U ovom su slučaju adhezijska i svojstva krutosti matrice krucijalna, te je uloga matrice održavanje geometrije vlakana (ravnina i položaj) i sprječavanje pojave deformacije vlakana.



Slika 3 Tlačno naprezanje kompozitnog laminata [1]

Smična naprezanja

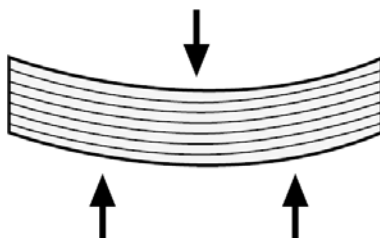
Slika 4. prikazuje kompozit izložen smičnom naprezanju. Ova vrsta naprezanja izaziva pojavu klizanja među slojevima ili vlaknima. Pod ovim opterećenjem matrica igra veliku ulogu, prenošenjem opterećenja duž kompozita. Za kompozit koji je otporan ovoj vrsti opterećenja, matrica ne samo da mora imati dobra mehanička svojstva nego i dobra adhezijska svojstva prema ojačalu (vlaknima). Interlaminarna (međuslojna) smična čvrstoća (ILSS) koristi se za indiciranje ove vrste naprezanja.



Slika 4 Smično naprezanje kompozitnog laminata [1]

Savojna naprezanja

Savojna naprezanja obično su kombinacija vlačnih, tlačnih i smičnih naprezanja. Opterećen kao na Slici 5., kompozit je izložen tlačnim i vlačnim naprezanjima.

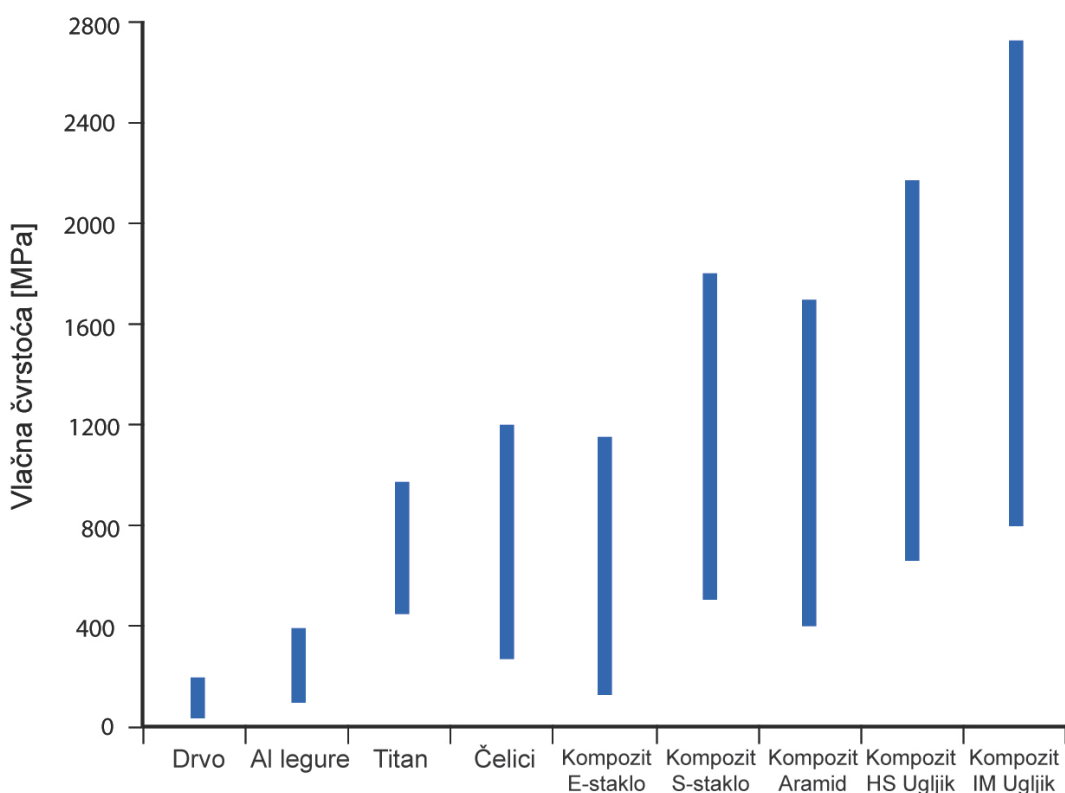


Slika 5 Savojno naprezanje kompozitnog laminata [1]

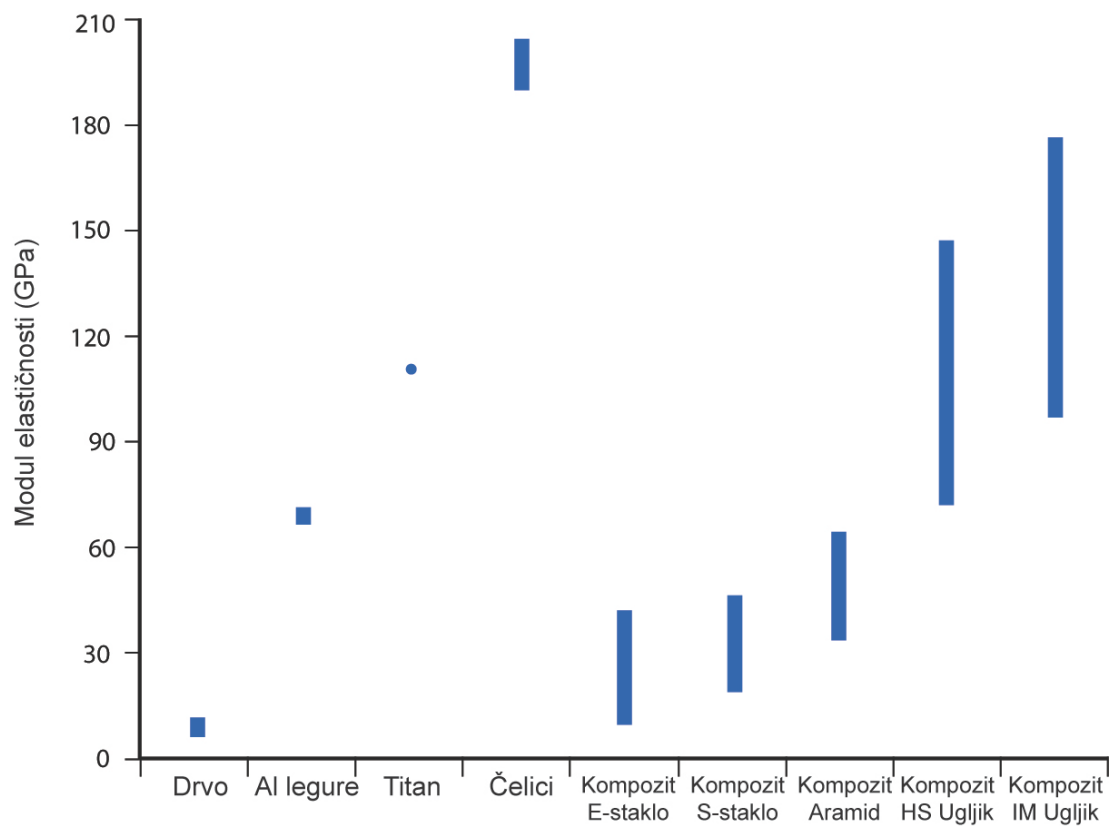
2.3 Usporedba sa ostalim konstrukcijskim materijalima

Prema prethodno opisanim faktorima, postoji širok opseg mehaničkih svojstava koja se mogu postići sa kompozitnim materijalima. Ako promatramo samo jednu vrstu vlakna, svojstva kompozita mogu varirati i do 10 puta ovisno o rasporedu (volumni udio) i orijentaciji vlakana u matrici. Najlošija svojstva kompozitnog materijala povezana su sa jednostavnijim procesima proizvodnje (npr. nanošenje staklenih vlakana špricanjem) a ona najbolja složenijim tehnološkim procesima proizvodnje (npr. kalupljenje u autoklavi preprega od staklenih vlakana) koji se mogu pronaći u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji.

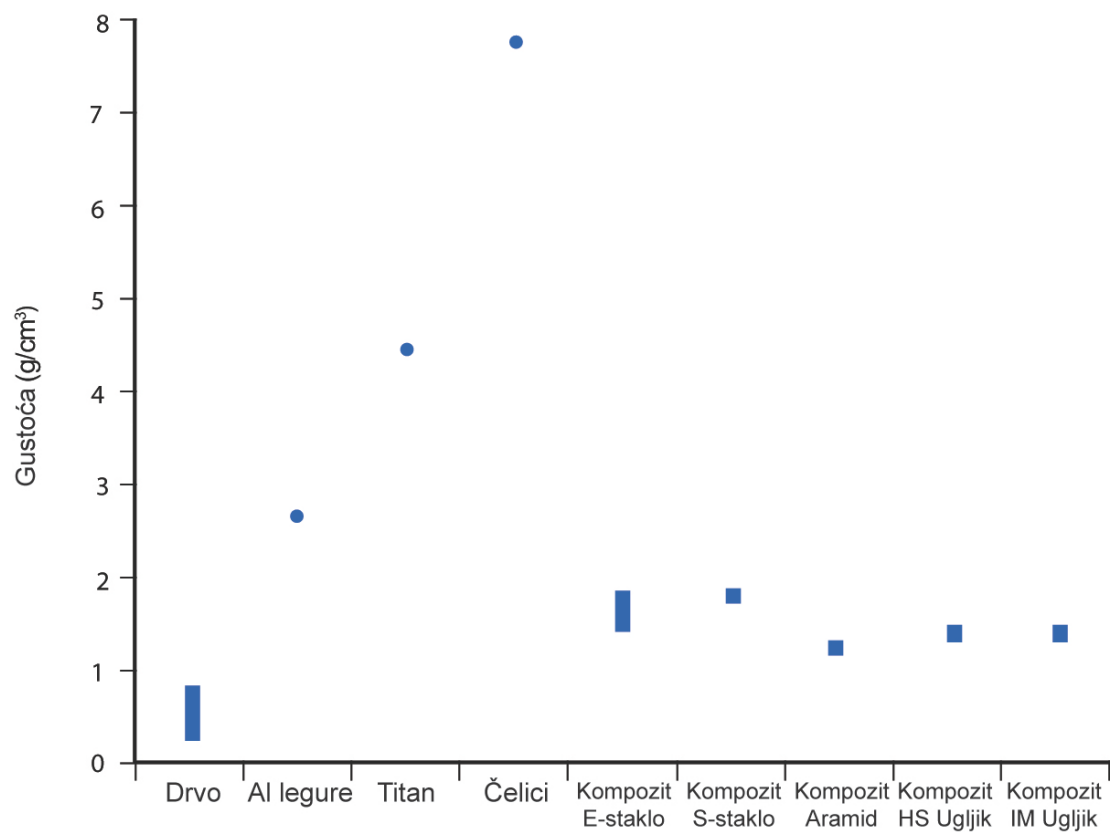
Za ostale prikazane materijale, raspon vrijednosti čvrstoća i krutosti (modula) dani su na slikama 6,7 i 8 da bi se prepoznao širok spektar svojstava povezanih sa različitim legurama, kao primjer.



Slika 6 Vlačne čvrstoće pojedinih konstrukcijskih materijala [1]



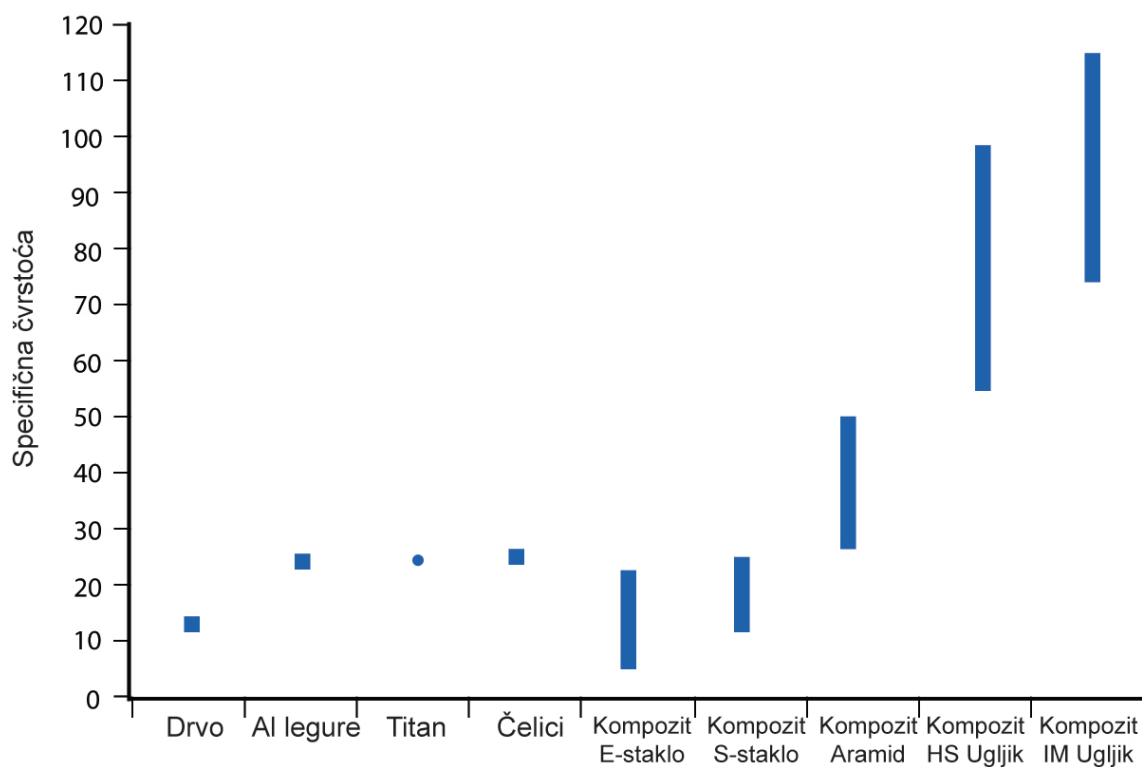
Slika 7 Moduli elastičnosti pojedinih konstrukcijskih materijala [1]



Slika 8 Gustoće pojedinih konstrukcijskih materijala [1]

Dijagrami jasno prikazuju raspon svojstava koje različiti kompozitni materijali mogu pokazati. Ta svojstva mogu se najbolje predložiti zbrojem visoke čvrstoće i krutosti te male gustoće. To su svojstva koja daju kompozitu karakteristike materijala visoke specifične čvrstoće i krutosti te ih time svrstavaju u materijale idealne za upotrebu u razne namjene. Ovo naprosto stoji za namjene koje uključuju gibanja, kao što su automobili, željeznička vozila, zrakoplovi, kako lagane konstrukcije u ovim prijevoznim sredstvima igraju veliku ulogu čineći ove materijale sve češće upotrebljivima.

Specifična čvrstoća ilustrirana je dijagramom u nastavku. Ovo su svojstva materijala svedeni na jedinicu mase.



Slika 9 Specifična čvrstoća konstrukcijskih materijala [1]

Daljnja usporedba kompozitnih laminata proizvedenih od različitih vrsta ojačala obrađena su kasnije u radu pod naslovom „Ojačala“.

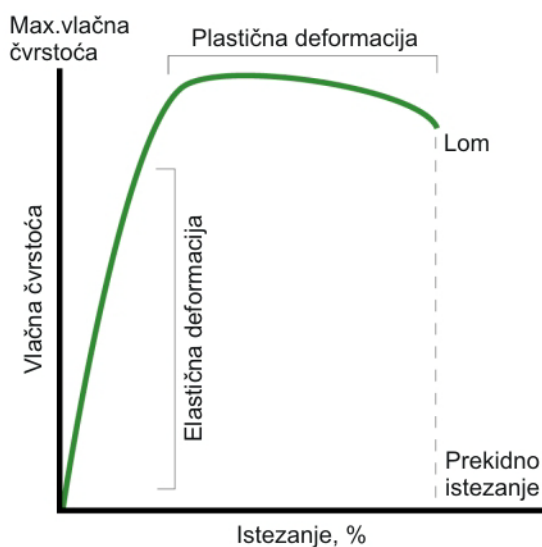
2.4 Matrice

Duromerni materijal za uporabu u izradi kompozitnih materijala kao matrice trebaju posjedovati sljedeća svojstva:

- Dobra mehanička svojstva
- Dobra adhezijska svojstva
- Dobra svojstva čvrstoće
- Dobru otpornost na degradaciju uslijed eksploatacije

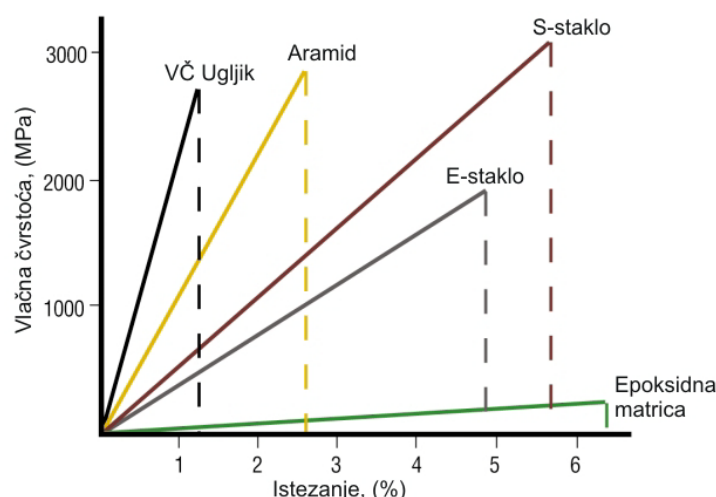
Mehanička svojstva matrica

Slika 10 prikazuje dijagram vlačna čvrstoća/istezanje za idealnu matricu. Krivulja za takovu matricu prikazuje maksimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, krutosti te prekidne čvrstoće (deformacija pojave loma matrice).



Slika 10 Svojstva materijala [1]

Treba naglasiti kada je kompozit opterećen vlačno, da bi se iskoristila najbolja svojstva vlakna, matrica se mora deformirati najmanje iste ili veće vrijednosti istezljivosti vlakna. Slika 11 prikazuje dijagram vlačna čvrstoća/istezanje za E-staklo, S-staklo, aramid te ugljik visoke čvrstoće. Ovdje se može uočiti, za primjer, da će S-staklo, sa istezljivosti 5,3%, zahtijevati matricu istezljivosti najmanje iste vrijednosti da bi se postigla maksimalna vlačna svojstva kompozita.



Slika 11 Svojstva materijala vlakana i matrice [1]

Adhezijska svojstva matrice

Visoka adhezijska svojstva između matrice i vlakana prijeko su potrebna da bi se osigurao prijenos naprezanja sa matrice na vlakna te time spriječile pukotine matrice/vlakana koje bi rezultiralo odvajanjem vlakana od matrice prilikom opterećenja.

Svojstva žilavosti matrice

Žilavost je svojstvo materijala da se odupire propagiranju pukotine, no kod kompozita to svojstvo teško je odrediti. Generalno, što veću deformaciju materijal matrice može podnijeti prije pojave pukotine to će ona biti žilavija i otpornija na pucanje. Obratno, što je materijal matrice manje žilav, kompozit proizveden od istog, biti će krhkiji i skloniji pucanju. Važno je ova svojstva povezati sa svojstvima vlakana impregniranih u materijal matrice.

Eksploatacijska svojstva matrice

Dobra otpornost na okolišne uvijete u eksploataciji, vodu i ostale agresivne medije, uz sposobnost izdržavanja cikličkog opterećenja, svojstva su koja matrica kompozitnog materijala mora zadovoljavati. Ova svojstva vrlo su važna u uvjetima eksploatacije u brodogradnji i sličnoj industriji.

Vrste materijala matrice kompozita

Svi polimeri izlažu važno zajedničko svojstvo, a to je da se sastoje od dugih lanaca molekula sastavljenih od mnogo ponavljanih jedinica (mera). Polimeri se tako u ovom slučaju mogu razvrstati u termoplaste i duromere ovisno o svojstvima koje pokazuju zagrijavanjem.

Termoplasti, kao metali, mekšaju i tale se prilikom zagrijavanja te hlađenjem otvrdnjavaju. Tako, proces prelaženja između temperature skrućivanja i taljenja može se ponavljati teoretski nebrojeno puta bez da se naruše svojstva materijala.

Duromeri se formiraju iz kemijske reakcije *in situ*, gdje su smola i otvrdnjivač ili smola i katalizator zamješani međusobno te se tako nepovratnom kemijskom reakcijom skrućuju. Kod nekih duromera kao što su fenolne smole, postoje lako isparavajuće komponente aktivirane povišenim temperaturama (kondenzacijska reakcija). Druge vrste smole kao što su poliesterske i epoksidne skrućuju se mehanizmom adicijske reakcije.

Tako skrućeni, duromeri više ne mogu poprimiti tekuće stanje zagrijavanjem, međutim zagrijavanjem, njihova svojstva bitno će se narušiti. Temperatura o kojoj je riječ je „temperatura staklišta“ (T_g). Iznad temperature staklišta, molekularna struktura duromera se mijenja iz krute kristalaste strukture u strukturu amorfno polimera manje krutosti. Promjena je reverzibilna u slučaju hlađenja ispod temperature staklišta T_g . Iznad temperature T_g , svojstvo kao što je krutost, znatno opada a kao posljedica tome, tlačna i posmična čvrstoća također. Ostala svojstva kao što je vodonepropusnost također su izrazito smanjena temperaturom iznad temperature T_g .

Unatoč postojanju različitih tipova smola koje se koriste u industriji kompozita, većina konstrukcija i njihovih strukturnih elemenata izrađeni su od tri osnovne vrste kao što su poliesterske, vinilesterske i epoksidne.

U nastavku detaljno su obrađena svojstva matrice od epoksidnih smola iz razloga svojih daleko najboljih svojstava u odnosu na ostale navedene vrste te njihove primjene.

Epoksidne smole

Epoksidne smole uglavnom su svojim mehaničkim svojstvima, otpornošću na degradaciju u eksploataciji bolje od ostalih tipova smola. To ih čini gotovo izuzetnim za uporabu u zrakoplovnim konstrukcijama. Svojstvo lakog laminiranja uz odlična adhezijska svojstva te otpornost na upijanje i zadržavanje vlage čine ovu vrstu smole idealnu za primjenu u brodograđevnoj industriji. Ovdje su epoksidne smole u širokoj upotrebi kao primarni konstrukcijski materijal u izradi brodova visokih preformansi (jedrilice, čamci i sl.), kao sekundarni koriste se kao obloga trupa ili zamjena materijala sklonih degradaciji uslijed djelovanja vlage i vlažnog okoliša. Epoksidne smole uglavnom se isporučuju tekuće, kao dvokomponentne, gdje se zamješavanjem ostvaruje kemijska reakcija koja nakon određenog vremena rezultira skrućivanjem.

Geliranje i skrućivanje

Povećanjem količine katalizatora ili dodataka za skrućivanje, smola postaje viskoznija do trenutka kada više nije tekuća te prestaje „teći“. Ovo svojstvo naziva se „gel point“, smola poprima svojstva gela. Smola se i dalje nastavlja skrućivati iz stanja gela, gdje na kraju poprima krajnju tvrdoću i sva svojstva matrice. Cijelokupan opisan proces naziva se skrućivanje smole u matricu. Ovaj proces odvija se uglavnom pri sobnim temperaturama. Postoji također mogućnost odvijanja procesa pri povišenim temperaturama što rezultira ubrzanim skrućivanjem te povišenjem mehaničkih svojstava nakon skrućivanja. Iskustveno, praksa je pokazala da povišenjem temperature odvijanja procesa za 10°C ubrzava proces skrućivanja za 100%. Postoji i mogućnost podvrgavanja povišenim temperaturama nakon skrućivanja što se još naziva „post cure process“, gdje se i time također omogućuje povišenje mehaničkih svojstava. Povećanjem temperature odvijanja procesa skrućivanja povećava se i temperatura staklišta (T_g).

Usporedba svojstava materijala matrice

Izbor materijala matrice tj. smole za upotrebu u izradi kompozitnih laminata ovisi o nekoliko stavki koje su karakteristične za sve kompozitne konstrukcije:

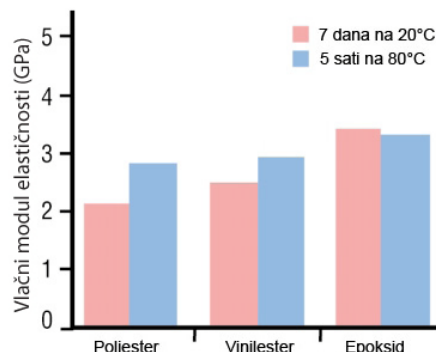
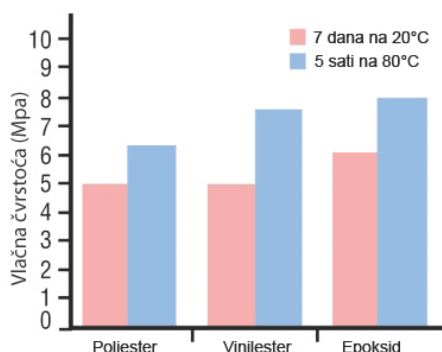
- Adhezijska svojstva
- Mehanička svojstva
- Otpornost stvaranju mikropukotina
- Otpornost na umor materijala
- Otpornost na prodiranje medija

Adhezijska svojstva

Već je prethodno objašnjeno kako su adhezijska svojstva matrice značajna za definiranje mehaničkih svojstava kompozita. Generalno, poliesterske matrice imaju najlošija adhezijska svojstva od spomenutih najznačajnijih tri vrste matrica. Vinilesterske matrice pokazuju bolja svojstva nasprem poliesterskih, međutim, epoksidne matrice pokazuju najznačajnija adhezijska svojstva te ih se može naći u različitim namjenama kao visokočvrsti adhezivi. Čvrstoća veze između matrice i vlakana ne ovisi samo o adhezijskim svojstvima matrice već i stanju površine vlakana što će biti opisano u poglavlju „ojačala“.

Mehanička svojstva

Dva osnovna mehanička svojstva matrica su vlačna čvrstoća i krutost. Slika 12. i Slika 13. prikazuju rezultate ispitivanja poliesterskih, vinilesterskih i epoksidnih smola srkućenih u matricu pri temperaturama od 20°C i 80°C.

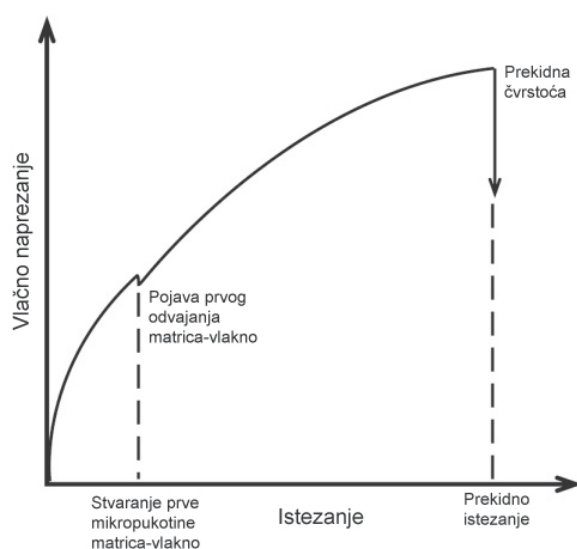


Slika 12 Usporedba vlačne čvrstoće [1], Slika 13 Usporedba vlačnog modula [1]

Nakon perioda skrućivanja u trajanju od 7 dana na sobnoj temperaturi, može se uočiti da epoksidna matrica ima mnogo bolja svojstva od poliesterskih i vinilesterskih matrica u oba slučaja. Jednako važno za konstruktore je i iznos skupljanja prilikom skrućivanja smole u matricu. To je pojava preraspodjele molekula u procesu skrućivanja kada smola ima svojstva tekuće faze i gela. Poliesterske i vinilesterske smole tako se skupljaju prilikom skrućivanja u matricu u iznosima do 8%, dok se epoksidne smole skupljaju samo do 2%. Stoga epoksidne matrice imaju bolja mehanička svojstva od ostalih dviju vrsta, te također manju pojavu zaostalih naprezanja prilikom skrućivanja koja se u eksploataciji mogu aktivirati.

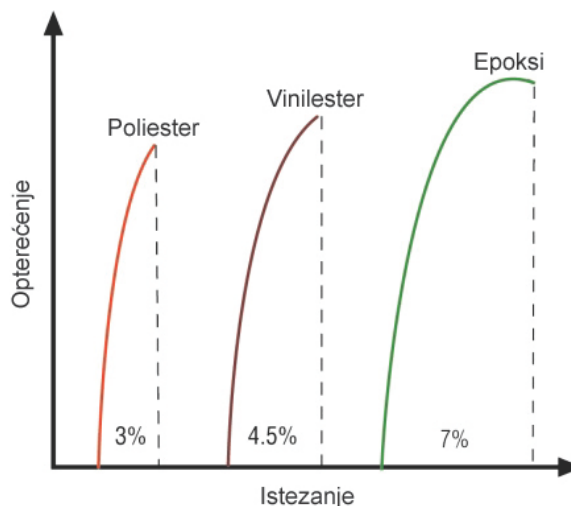
Otpornost stvaranju mikro-pukotina

Pod terminom čvrstoće kompozitnog laminata podrazumjeva se koliko opterećenja laminat može podnijeti prije negoli pretrpi potpun lom. Granica razvlačenja kompozitnog laminata je točka kada dolazi do pucanja matrice i vlakana. Dakako, prije negoli dođe do postizanja prekidne čvrstoće kompozitnog laminata, laminat će pretrpjeti opterećenje kod kojeg dolazi do pojave prve mikro-pukotine u matrici, Slika 14. Razumljivo je da će prije doći do loma matrice nego loma vlakana zbog svojstva čvrstoće materijala. Zaključak je dakle, inženjer projektant, koji želi trajnu i izdržljivu konstrukciju, mora osigurati da opterećenja na laminat ne prelaze granicu prethodno utvrđenih vrijednosti na koja je projektiran.



Slika 14 Vlačno opterećenje kompozitnog laminata [1]

Istezanje koje laminat može postići prije pojave prve pukotine ovisi o žilavosti i adhezijskim svojstvima matrice. Dobro poznata adhezijska svojstva matrice pomažu laminatu ostvariti veću otpornost na pojavu mikropukotina. Na slici 15. dana je usporedba svojstava materijala poliesterskih, vinilesterskih i epoksidnih matrica:



Slika 15 Usporedba svojstava materijala matrica [1]

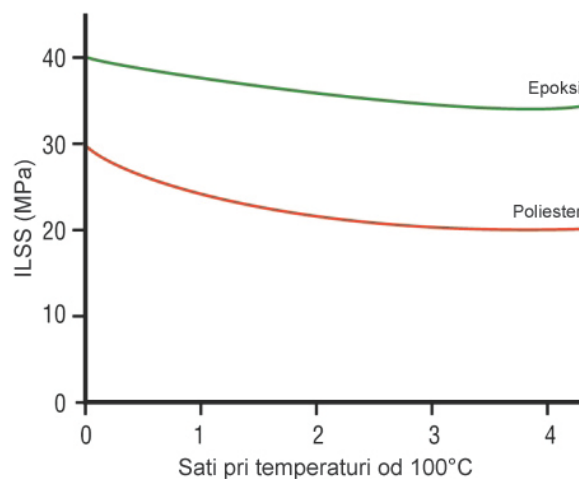
Otpornost na umor materijala

Kompozitni materijali pokazuju dobru otpornost na umor materijala u usporedbi sa metalima. Kako je umor materijala rezultat postupnog nakupljanja malog broja oštećenja, umor kompozitnog materijala uvjetovan je žilavosti matrice, otpornosti na pojavu mikropukotine, te količini praznina ili uključaka koji se javljaju tijekom procesa proizvodnje kompozitnih struktura ili konstrukcija. Kompozitni laminati bazirani na epoksidnim matricama teže jako dobroj otpornosti na umor materijala u usporedbi sa laminatima baziranim na poliesterskim i vinilesterskim matricama. Ovo je jedan od ključnih razloga zašto se ovakove vrste kompozitnih laminata koriste u zrakoplovnoj industriji.

Otpornost na prodiranje medija

Važno svojstvo svake matrice, pogotovo u eksploataciji u brodogradnji, je svojstvo otpornosti na degradaciju uslijed prodiranja medija (vlaga, voda...). Svaki materijal matrice će upiti nešto vlage/vode te time povećati masu kompozitne konstrukcije, no ono što je značajnije je kako ta vlaga/voda utječe na čvrstoću matrica-vlakno i da li će dugotrajno razmatrajući narušiti interlaminarna svojstva. Za poliesterske

matrice može se očekivati da će u tom slučaju uspjeti zadržati 65% interlaminarne smične čvrstoće (ILSS) dok će za isto vrijeme, epoksidne matrice zadržati 90%.



Slika 16 Svojstva kompozitnih laminata nakon uranjanja u vodu pri 100°C [1]

Slika 16 Prikazuje svojstva poliesterskih i epoksidnih smola ojačanih staklenim vlaknima nakon određenog perioda uronjenih u vodu pri temperaturi od 100°C. Ova povišena temperatura ima za svojstvo ubrzavanja procesa degradacije za uronjene laminate.

Sažetak i pregled svojstava materijala matrica

Tabela 1 Pregled svojstava materijala matrice

Materijal matrice	Prednosti	Nedostaci
Poliester	<ul style="list-style-type: none"> jednostavan za uporabu cijena 	<ul style="list-style-type: none"> umjerena mehanička svojstva visoke emisije plinova (stiren) prilikom skrućivanja u otvorenim kalupima visoke vrijednosti stezanja prilikom skrućivanja -limitiran vijek trajanja proizvoda
Vinilester	<ul style="list-style-type: none"> Visoka otpornost na kemijske utjecaje Visoka otpornost na eksploatacijske utjecaje Bolja mehanička svojstva od poliesterskih 	<ul style="list-style-type: none"> Za bolja mehanička svojstva potreban „post cure“ proces Visok udio stirena Viša cijena nego kod poliesterskih Visoke vrijednosti stezanja prilikom skrućivanja
Epoksi	<ul style="list-style-type: none"> Visoka mehanička i toplinska svojstva Visoka otpornost na prodor medija Laka uporaba uz kratko vrijeme Niske vrijednosti skupljanja kod skrućivanja Uporabne temperature 140°C vlažno/220°C suho 	<ul style="list-style-type: none"> Skuplji nego vinilesterski Zamješavanje komponenti Skloniji koroziji

2.5 Ojačala

Uloga ojačala, u ovom slučaju vlakana, u kompozitnim materijalima u osnovi je povećanje mehaničkih svojstava materijala matrice. Kako postoje različite vrste vlakana u kompozitnim materijalima, tako ona posjeduju različita svojstva koja time utječu na svojstva samog kompozitnog materijala. Svojstva i karakteristike uobičajenih tipova vlakana koja se koriste u kompozitnim materijalima objašnjena su u nastavku.

Pojedinačna vlakna ili snopovi vlakana mogu se samo koristiti sami za sebe u nekoliko proizvodnih procesa. Za većinu drugih primjena, vlakna moraju biti raspoređena u obliku „plahti“, poznatije kao tkanine, kako bi se njima lakše manipuliralo u proizvodnji kompozitnih konstrukcija. Postoje različiti načini kako se vlakna slažu u tkanine, tako i njihove orijentacije prilikom slaganja gdje svaka za sebe posjeduje određena svojstva. Vrste tkanja biti će obrađene kasnije u radu.

Svojstva vlakana

Mehanička svojstva većine vlakana značajno su viša nego ona neojačanih mtrica. Tako, mehanička svojstva vlaknima ojačanih kompozita, dominiraju sa strane vlakana. Četiri glavna faktora zbog kojih je to tako su:

- Osnovna mehanička svojstva samih vlakana
- Površinska interakcija vlakna i matrice
- Volumni udio vlakana u kompozitu (FVF)
- Orijentacija (raspored) vlakana u kompozitu

Osnovna mehanička svojstva najznačajnijih i najprimjenjivijih vrsta vlakana prikazana su u nastavku tablicom. Interakcija površina vlakana i matrice ovisi o vezi među njima. Ovo je uvjetovano stanjem površine vlakana. Količina vlakana u kompozitu većinom je uvjetovana proizvodnim procesom koji se koristi u tu svrhu. Naravno, tkanja sa usko slaganim vlaknima dati će veći volumni udio vlakana u kompozitu (FVF) nego ona sa „grubljim“ slaganjem tj. tkanja sa većim razmakom u rasporedu vlakana. Promjer vlakana je bitan faktor, gdje su vlakna manjeg promjera skuplja no daju veću površinu te povećavaju površinsku interakciju

između vlakana i matrice što je povoljnije. Generalno, čvrstoća i krutost kompozita će se povećavati proporcionalno sa povećanjem volumnog udjela vlakana u matrici. Međutim, iznat 60-70% FVF (ovisno o načinu na koji vlakna usmjerena i tkana) iako vlačna krutost i dalje može rasti, sama čvrstoća laminata dostiže vršnu vrijednost te tada počinje opadati zbog „manjka“ materijala matrice koji nastoji objediniti vlakna u kompozitnom materijalu. Kako su vlakna konstruirana da podnose opterećenja duž njihove duljine a ne duž širine, orijentacija vlakana čini veliku ulogu u definiranju svojstava kompozita. Ovo anizotropno svojstvo kompozita može se vrlo dobro iskoristiti prilikom konstruiranja, gdje se vlakna orijentiraju u smjeru opterećenja.

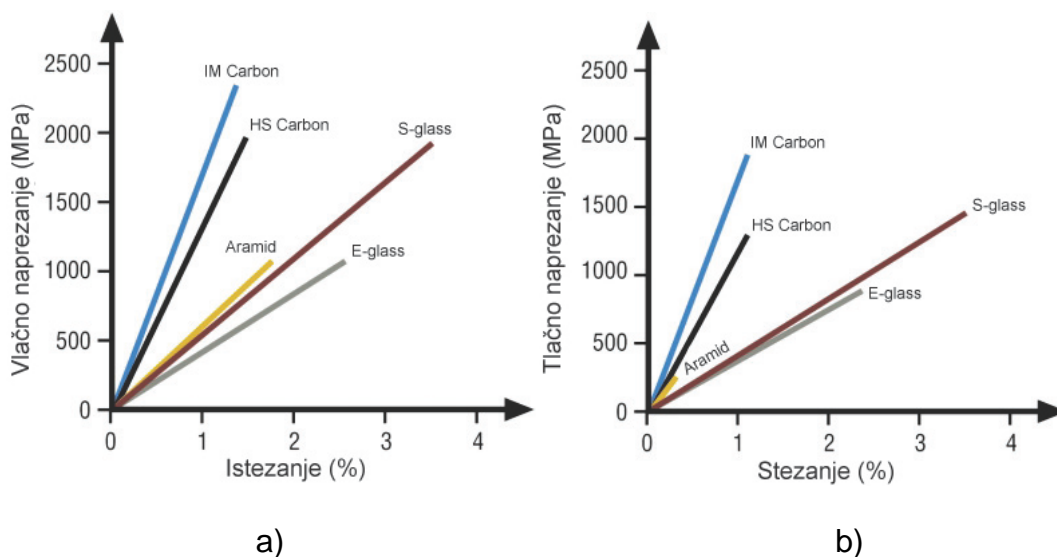
Osnovna mehanička svojstva vlakana

Tabela 2 Pregled svojstava materijala ojačala

Vrsta materijala	Vlačna čvrstoća (MPa)	Vlačni modul (GPa)	gustoća (g/cc)	Specifični modul
Carbon HS	3500	160 – 270	1.8	90 - 150
Carbon IM	5300	270 – 325	1.8	150 - 180
Carbon HM Carbon	3500	325 – 440	1.8	180 – 240
UHM	2000	440+	2.0	200+
Aramid LM	3600	60	1.45	40
Aramid HM	3100	120	1.45	80
Aramid UHM	3400	180	1.47	120
Glass - E glass	2400	69	2.5	27
Glass - S2 glass	3450	86	2.5	34
Glass - quartz	3700	69	2.2	31
Al legure(7020)	400	1069	2.7	26
Titan	950	110	4.5	24
Meko željezo	450	205	7.8	26
Nehrđajući čelik	800	196	7.8	25
Brzorezni čelik	1241	197	7.8	25

Mehanička svojstva laminata

Svojstva vlakana prethodno prikazana tablicom daju samo djelomičnu sliku stvari. Svojstva kompozita razlikovat će se ovisno o vrsti vlakana kojima je ojačana matrica, interakciji vlakna i matrice, svojstvima matrice dakako, volumnom udjelu vlakana u matrici i njihovoj orijentaciji. Slika 17. u nastavku prikazuje usporedbu osnovnih vrsta vlakana koja se najviše koriste danas kao unidirekcijski epoksidni preprezi u zrakoplovnoj industriji.



Slika 17 Svojstva laminata od unidirekcijskog preprega; a) vlačna, b) tlačna [1]

Dijagrami na slici 17 vlačno naprezanje i istežanje različitih kompozitnih materijala. Također, grafovi prikazuju kako neka vlakna, primjerice aramidna, prikazuju različita svojstva kada su opterećenja tlačno nasprem svojstava pri vlačnom opterećenju.

Vrste materijala vlakana

Staklena vlakna

Topljenjem prirodnih minerala kao što su pijesak, kaolin, vapnenac i koleanit pri temperaturi 1600°C, formira se tekuće staklo. Takva faza, propušta se kroz mikroskopske mlaznice te simultano hladi kako bi se proizvela vlakna promjera 5-24μm. Takova vlakna naknadno se prevlače zaštitnim slojem koji ima funkciju prijonljivosti u matricu i zaštitu od abrazije. Prema varijaciji raznih komponenata, različita stakla je mogu proizvesti. Vrste stakala za proizvodnju staklenih vlakana korištenih u očvršćenjima kao što su kompoziti su:

- E-staklo (električno) – niska razina lužina te više čvrstoće od A stakla. Dobra vlačna i tlačna čvrstoća te krutost, dobra električna svojstva te relativno niska cijena, no otpornost na udarna opterećenja su relativno loša. E-staklo najčešće se koristi u vlaknima ojačanim polimernim kompozitima.



- C-staklo (kemijsko) – najbolja otpornost prema kemijskim utjecajima. Uglavnom se koristi u kompozitnim konstrukcijama kao vanjski sloj kod cijevi i tankova.
- R,S, T-staklo – viša vlačna čvrstoća i veći modul nego E-staklo. Veća ILLS te dobra otpornost na propuštanje vlage/vode uz male promjere vlakana. Razvijena su uglavnom za zrakoplovnu i ratnu industriju u protubalističke svrhe. Najskuplja je vrsta stakla.

Aramidna vlakna

Aramidno vlakno je sintetički organski polimer. Posjeduje visoku čvrstoću te nisku gustoću što mu daje veliku specifičnu čvrstoću. Sve vrste aramidnih vlakana imaju dobru otpornost na udarna opterećenja te niske vrijednosti modula te se koriste u protubalističke svrhe. Samo je tlačna čvrstoća približna E-staklu po svojstvima. Vlakna također pokazuju dobru otpornost na abraziju te kemijsku i temperaturnu degradaciju. Međutim, imaju lošu otpornost na UV zračenje.



Ugljična vlakna

Ugljična vlakna proizvedena su kontroliranom oksidacijom, carbonizacijom i grafitizacijom ugljikom bogatih organskih polimera koji su prethodno oblikovani u vlakna. Najčešće se upotrebljava PAN (polyacrylonitrile) koji pokazuje najbolja svojstva no moguće je proizvesti ugljična vlakna i iz celuloze ili smole. Ovisno o procesu grafitizacije proizvesti se mogu vlakna visoke čvrstoće ili visokog modula uz ostala svojstva. Onda kada su proizvedena, ugljična vlakna podvrgavaju se površinskoj obradi da bi se unaprijedila svojstva prijanjanja u matricu te otpornosti na kemijske i druge utjecaje. Ugljična vlakna pretežno su grupirana u skupine ovisno o modulu savijanja kada se svojstva počinju narušavati. Tako postoje visokočvrsti (HS - high strenght), srednječvrsti (IM - intermediate strenght), visokog modula (HM - high modulus) i ultravisokog modula (UHM – ultra high modulus). Ugljična vlakna imaju najveću specifičnu krutost od sviju komercijalno dostupnih vlakana, jako veliku čvrstoću, no veću krhkost nasprem drugih materijala vlakana.



Usporedba svojstava materijala vlakana

Uspoređujući međusobno svojstva svih vrsta materijala vlakana vidljivo je da svi imaju svoje prednosti i nedostatke. Na osnovu toga određuje se naravno, koji je pogodniji za određenu vrstu i mjesto primjene. Tabela u nastavku prikazuje koliko je koje od svojstava materijala dobro spram drugih i to slovima „A“ kao najbolje svojstvo spram drugih vrsta, te „C“ najlošije.

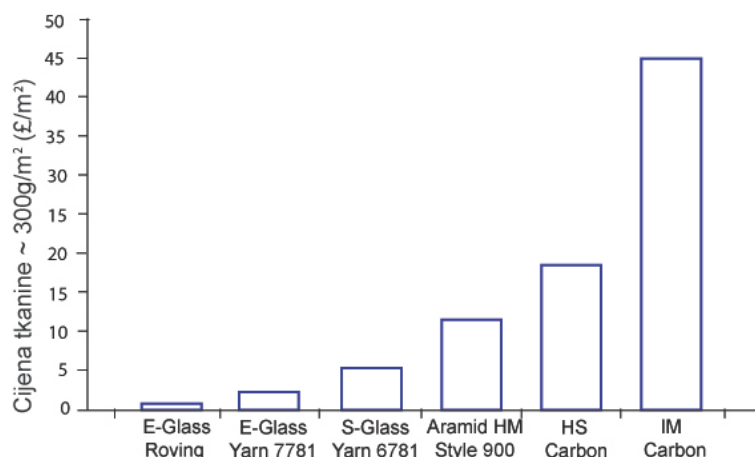
Tabela 3 Usporedba svojstava materijala ojačala

Svojstvo	Aramid	Ugljik	Staklo
Vlačna čvrstoća	B	A	B
Vlačni modul	B	A	C
Tlačna čvrstoća	C	A	B
Tlačni modul	B	A	C
Savojna čvrstoća	C	A	B
Savojni modul	B	A	C
Udar na čvrstoću	A	C	B
Interlaminarna smična čvrstoća	B	A	A
Gustoća	A	B	C
Otpornost na umor materijala	B	A	C
Otpornost gorenju	A	C	A
Toplinska izolacija	A	C	B
Električna izolacija	B	C	A
Toplinska dilatacija	A	A	A
Cijena	C	C	A

Također osim opisanih vrsta vlakana postoje i druge vrste koje nisu našle toliku široku primjenu u kompozitnim materijalima a to su: poliesterska, polietilenska, kvarcna, keramička te prirodna kao što su juta i sisal.

Usporedba cijena materijala vlakana

Dijagram 18 prikazuje izračun cijene materijala vlakana za tkanje mase 300g/m^2 . Cijene vlakana značajno su veće za „lakša“ tkanja (manji tex).



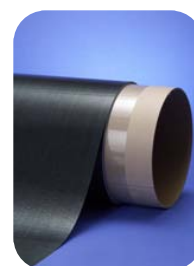
Slika 18 Prosječne cijene materijala vlakana [1]

Vrste tkanina i raspored vlakana

U polimernim kompozitima termin „tkanina“ definiran je kao skup dugih ugljičnih, aramidnih ili staklenih vlakana ili njihove međusobne kombinacije koji formiraju ravnu platu jednog ili više slojeva vlakana. Ovi slojevi drže se međusobno primarno mehanički ometanjem vlakana ili sekundarno upotrebom drugog materijala za povezivanje kako bi se vlakna zadržala u željenom rasporedu. Tkanine su podjeljene po orijentaciji vlakana koja se koriste, te postoje različiti postupci i metode za dobivanje takovih rasporeda. Postoje četiri glavne skupine orijentacije vlakana: unidirekcijska, $0/90^\circ$, multiaksijalna, nasumce orijentirana.

Unidirekcijske (jednosmjerne) tkanine

Unidirekcijske tkanine su one kod kojih je većina vlakana usmjerena samo u jednom smjeru. Manji dio vlakana ili nekog drugog materijala može biti usmjeren u drugom smjeru pretežno u svrhu pridržavanja glavnih vlakana te u većini slučajeva ne pokazuju značajna mehanička svojstva. Unidirekcijske tkanine uglavnom imaju usmjerena vlakna pod 0° ili 90° u smjeru valjanja. Unidirekcijske tkanine daju mogućnost postavljanja vlakana na točno određena mjesta u optimalnoj količini zbog toga što su ravna tj. teško se nabiru. To rezultira najvišim



mogućim iskorištenjem svojstava vlakana tkanine u kompozitnoj konstrukciji. Što se tiče mehaničkih svojstava unidirekcijskih tkanina, najbolja svojstva i najširu primjenu imaju tkz. unidirekcijske prepreg trake gdje ne postoje vlakna ili drugi materijali koji drže primarna vlakna, nego su ona impregnirana smolom.

0°/90°

Za primjenu u konstrukcijama gdje je potrebno upotrijebiti orijentaciju vlakana u više nego jednom smjeru, koriste se unidirekcijske tkanine orijentacije 0° i 90°. Ovo su uobičajeno tkani materijali no postoji i mogućnost šivanja slojeva što će naknadno biti obrađeno.

Tkanja

Tkanja su uglavnom proizvedena preplitanjem vlakana 0° i 90° u određenu strukturu/uzorak. Integritet samog tkanja održan je mehaničkim svojstvima preplitanja vlakana. Podatljivost, glatkoća površine te postojanost tkanine uvjetovana je strukturom/uzorkom tkanja. Masa i poroznost tkanine određeni su pravilnim odabirom „tex-a“ (masa po jedinici dužine = 1 g/1000 m = tex). Tex se još može tumačiti i kao broj vlakana u „svežnju“ (konac). U nastavku su prikazana neka od tkanja koja se najčešće koriste.



Tabela 4 Pregled izgleda i svojstava tkanja materijala ojačala

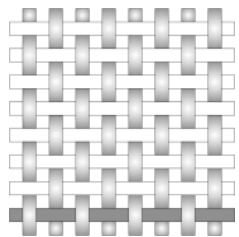
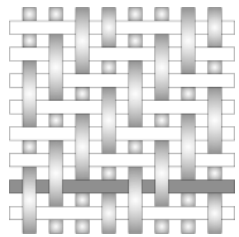
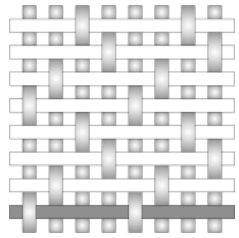
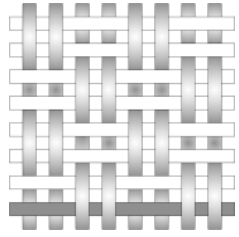
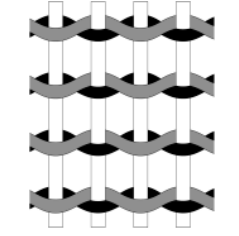
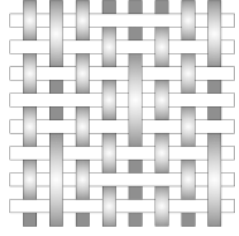
Vrsta tkanja	Svojstva	Izgled
Plain	<ul style="list-style-type: none"> • Simetrična, • Dobra postojanost • Prosječna poroznost • Značajno nabiranje • Visoka glatkoća površine 	
Twil	<ul style="list-style-type: none"> • Odlično odvlaživanje • Snižena podatljivost • Visoka glatkoća površine • Bolja mehanička svojstva od „Plain“ 	
Satin	<ul style="list-style-type: none"> • Laka oblikovljivost • Dobra podatljivost • Malo nabiranje • Dobra mehanička svojstva • Asimetrična 	
Basket	<ul style="list-style-type: none"> • Slična Plain-u • Manje nabiranje nego kod Plain-a • Čvršća od Plain-a • Manje stabilnija od Plain-a 	
Leno	<ul style="list-style-type: none"> • Tkanina sa najmanje vlakana • Tkz. otvorena tkanina • Koristi se u kombinaciji sa drugim tkanjima • 	
Mock-Leno	<ul style="list-style-type: none"> • Slična Plain-u • Povećana je debljina nasprem Plain-a • Grublja površina • Veća potoznost tkanine 	

Tabela 5 Usporedba svojstava tkanja materijala ojačala

Svojstva	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno	Mock
Dobra Postojanost	****	***	**	**	*****	***
Dobra podatljivost	**	****	*****	***	*	**
Niska poroznost	***	****	*****	**	*	***
Glatkoća	**	***	*****	**	*	**
Simetričnost	*****	***	*	***	*	****
Malo nabiranje	**	***	*****	**	**/*****	**

***** = odlično,
 **** = dobro,
 *** = zadovoljavajuće,
 ** = loše,
 * = jako loše

Šivana tkanja 0/90°

0/90° tkanine moguće je izraditi šivanjem što efikasno objedinjuje dva sloja unidirekcijskih materijala u tkaninu. Šivane 0/90° tkanine mogu pokazati i do 20% bolja svojstva od tkanja zbog sljedećih faktora:

- Paralelna vlakna bez nabiranja odmah preuzimaju opterećenja
- Ne postoje koncentracije naprezanja kao kod tkanja gdje postoji preplitanje vlakana
- Veća gustoća vlakana u kompozitnom laminatu se može postići nasprem tkanja

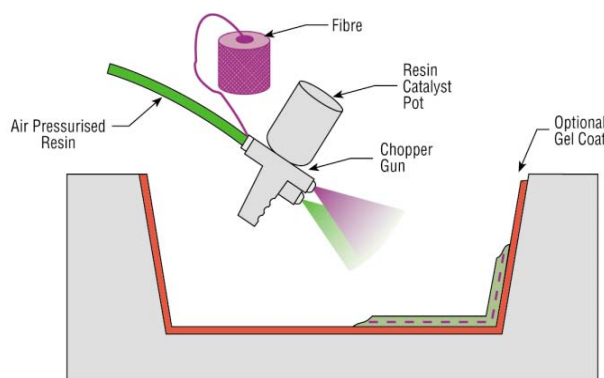
Hibridne tkanine

Termin „hibridne“ u nazivu podrazumjeva tkanine koje se sastoje od više od jedne vrste materijala vlakana od kojih je tkanina izrađena. U višeslojnim kompozitnim laminatima ako su potrebna svojstva više vlakana tada postoji mogućnost izrade kompozitnog laminata od dvije ili više vrsta vlakana. Hibridne tkanine najviše se primjenjuju kod 0/90° tkanina, unidirekcijskih i multidirekcijskih tkanina. Postoje kombinacije: ugljik/aramid, aramid/staklo i ugljik/staklo.

3. Proizvodni procesi

Ako gledamo sve kompozitne materijale zajedno, postoji niz različitih materijala između kojih možemo birati kao što su materijali matrice i vlakana skupa sa njihovim asortimanom svojstava; čvrstoća, krutost, žilavost, otpornost na povišene temperature, cijena, proizvodnja...Dakako, krajnja svojstva kompozitnog laminata ili konstrukcije nisu funkcija samo individualnih svojstava matrice i vlakana nego i svojstava na koji način su oni ugrađeni u konstrukciju i na koji način su ti materijali proizvedeni. Ovo poglavlje obrađuje nekoliko proizvodnih procesa i metoda za proizvodnju kompozita koji se danas najčešće koriste.

Naštrcavanje (Spray Lay-up proces)



Slika 19 Spray Lay-up proces

Opis:

Vlakna su sjeckana u tkz.pištolju koji je istodobno dobavljan smolom pod visokim tlakom te katalizatorom. Sasječena vlakna izlaze kroz jednu, dok katalizirana smola izlazi kroz drugu sapnicu te se kao takva našpricavaju u kalup. Skrućivanje takovog kompozitnog materijala odvija se pri normalnim atmosferskim uvjetima.

Izbor materijala:

Smole: primarno poliesterske

Vlakna: roving staklena

Prednosti:

- Široko se koriste mnogo godina.
- Niska cijena zbog brzog polaganja vlakna/smola (ekonomičnost).
- Niska cijena alata.

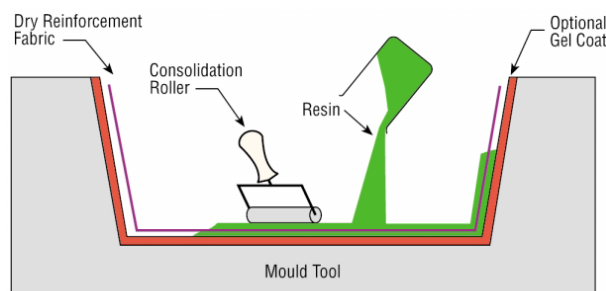
Nedostaci:

- Laminata imaju tendenciju da je jako obogaćen smolom stoga su takovi laminati pretjerano teški.
- Zbog kratkih vlakana ozbiljno su ograničena mehanička svojstva laminata.
- Smola treba biti niske viskoznost da bi se lakše naštrcala. To je obično kompromis mehaničkih / toplinskih svojstava.
- Visoki sadržaj stirena naštrcavajuće smole obično znači da ima visoki potencijal štetnosti te njen niski viskozitet znači da ima povećanu sklonost prodrijeti kroz odjeću i sl.
- Ograničavanjem koncentracije lebdećih čestica stirena je vrlo teško.

Primjene:

Jednostavna i laka kućišta, lake strukturne ploče, npr. tijela karavana, dijelovi kamiona, kade, tuševi itd.

Ručno laminiranje u otvoreni kalup (Wet Lay-up/Hand Lay-up proces)



Slika 20 Wet Lay-up/Hand Lay-up proces

Opis:

Smole su impregnirane ručno u vlakna koja su u obliku tkanja / pletiva. To je obično ostvareno valjkom ili četkom uz sve veću upotrebu neke vrste impregnatora za forsiranje smole u tkaninu. Laminat je nakon takovog tretmana prepušten skrućivanju uz atmosferske uvjete.

Izbor materijala:

Smole: Bilo koje, na primjer epoxy, poliesterske, vinylester, fenolne.

Vlakna: Bilo koja, iako teške aramidne tkanine može biti teško impregnirati wet-out tehnikom rukom.

Prednosti:

- Široko se koriste mnogo godina.
- Proces je vrlo jednostavan
- Niska cijena alata.
- Širok izbor dobavljača i vrsta materijala
- Veći udio vlakana te vijek trajanja nasprem procesa naštrecavanja

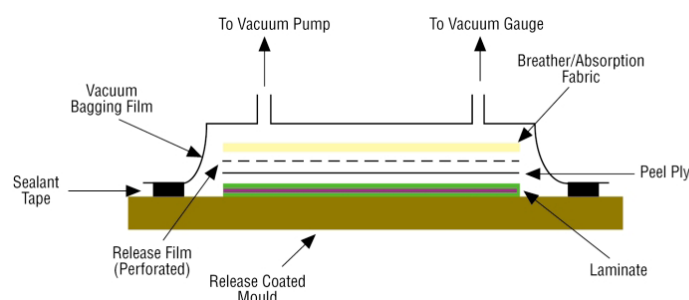
Nedostaci:

- Mješanje smole, sadržaj smole u laminatu i kvaliteta laminata su vrlo ovisne o vještini osobe koja ga proizvodi.
- Zdravlje i sigurnost po pitanju smole.
- Ograničavanjem koncentracije lebdećih čestica stirena poliesterskih i vinilesterskih smola je vrlo teško bez skupih ekstrakcijskih sustava.
- Smole treba biti što niže viskoznosti u biti djelatna rukom. To je pitanje kompromisa njenih mehaničkih i toplinskih svojstva zbog potrebe za visokim udjelom otapala / razinama stirena.

Primjene:

Stadardne lopatice vjetro-turbina, proizvodnja lakih brodica, arhitektonsko modeliranje.

Vakuumiranje (Vacuum Bagging proces)



Slika 21 Vacuum Bagging proces

Opis:

Ovo je praktički nadograđeni **Wet Lay-up** proces prethodno opisan gdje je prisutan tlak prilikom impregniranja tkanine smolom kako bi se poboljšala svojstva konsolidacije (što bolje impregniranje tkanine smolom). To je ostvareno na način da se impregnirana tkanina prevlači plastičnom folijom te se iz prostora između laminata koji se izrađuje i plastične folije isisava zrak te se postiže niski vakuum pumpom.

Izbor materijala:

Smole: Primarno epoksidne i fenolne. Poliesterske i vinilesterske mogu predstavljati problem zbog prevelike ekstrakcije stirena iz smole prilikom djelovanja vakuum pumpe.

Vlakna: Bilo koja zbog djelovanja tlaka uslijed vakuum-a.

Prednosti:

- Izrada laminata sa većim udjelom vlakana nego sa **Wet Lay-up** procesom
- Manji udio nesavršenosti nego kod prethodo opisanih procesa
- Bolja svojstva prijanjanja smole oko vlakana zbog djelovanja vakuum-a
- Zdravlje i sigurnost su osigurani. Plastična folija znatno smanjuje koncentraciju lebdećih čestica stirena poliesterskih i vinilesterskih smola prilikom skrućivanja

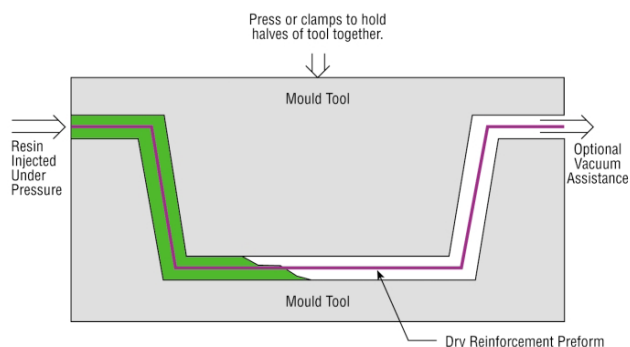
Nedostaci:

- Skuplji proces s obzirom na prethodno opisane
- Potrebne su bolje vještine osoba koje rukuju ovim procesom
- Mješanje smole dosta ovise o iskustvu i vještinama osoba koje rukuju procesom

Primjene:

Dijelovi krstarećih brodova, dijelovi trakćih automobila, dijelovi lakih zrakoplova itd.

Ubrizgavanje smole u kalup (Resin Transfer Moulding (RTM) proces)



Slika 22 RTM proces

Opis:

Tkanina je postavljena u kalup u suhom stanju. Gornji dio alata zatvara kalup te se tada ubrizgava smola u kalupnu šupljinu. Također postoji mogućnost i primjene vakuum-a kako bi se pospješio sam proces. Jednom kada je tkanina natopljena, ubrizgavanje smole se prekida te se laminatu omogućuje skrućivanje u kalupnoj šupljini.

Izbor materijala:

Smole: Epoksidne, poliesterske, vinielsterske i fenolne

Vlakna: Sve vrste vlakana

Prednosti:

- Izrada laminata sa većim udjelom vlakana
- Mali udio nesavršenosti
- Zdravlje i sigurnost su osigurani jer se skrućivanje odvija u zatvorenom kalupu te je niska koncentracija štetnih elemenata pri skrućivanju
- Obje strane laminata poprimaju geomteriju kalupa

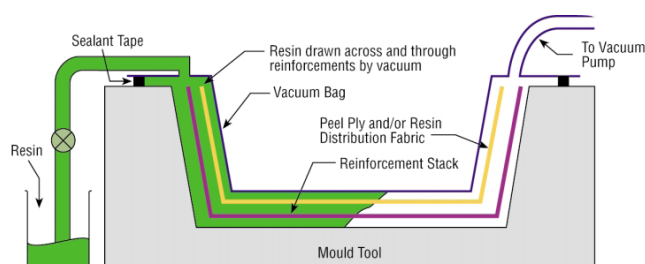
Nedostaci:

- Skup proces
- Teška i skupa oprema
- Uglavnom primjenjiva za manje komponente i izradke
- Nesavršenosti kod skrućivanja u kalupu mogu rezultirati skupim otpadnim djelovima

Primjene:

Mali lagani zrakoplovi i dijelovi automobila, sjedalice tramvaja, vlakova, autobusa itd.

Ubrizgavanje smole u otvoreni kalup podpomognuto vakuumom (Vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM))



Slika 23 VARTM proces

Opis:

Tkanina je postavljena u kalup u suhom stanju. Na takovu tkaninu stavljen je sloj tkanine za odvajanje viška smole (Abrazj). Tkanine su prevučene folijom za vakuumiranje te je ista zabrtvljena. Ovom tehnologijom omogućeno je kontinuirana dobava smole u laminat.

Izbor materijala:

Smole: Epoksidne, poliesterske, vinilsterske i fenolne

Vlakna: Sve vrste vlakana i tkanina, šivane tkanine

Prednosti:

- Izrada laminata sa većim udjelom vlakana
- Mali udio nesavršenosti kako je omogućena kontinuirana dobava smole
- Izradci komplicirane geometrije
- Jeftinija tehnologija od RTM zbog upotrebe jednodjelnog kalupa
- Mogućnost izrade kompozitnih djelova sa jezgrom (sendivč- sačasti kompoziti)

Nedostaci:

- Kompliciraniji postupak od RTM-a
- Smola mora biti manjeg viskoziteta, mora imati što bolja kapilarna svojstva
- Nesavršenosti kod skrućivanja u kalupu mogu rezultirati skupim otpadnim djelovima

Primjene:

Dijelovi i izradci za brodova, automobila, zrakoplova itd.

Postoje još i drugi procesi za proizvodnju kompozitnih laminata i kompozitnih izradaka kao što su: Namatanje (Filament Winding), Pultrudiranje (Pultrusion), VARTM (Vacuum assisted resin transfer moulding), SCRIMP, RIFT, Izrada preprega itd. Opisane tehnike najviše se koriste za jednostavnije i lakše opterećene konstrukcije te su iz tog razloga detaljnije spomenute.

4. Spajanja kompozitnih laminata

Postoje dvije vrste strukturnog spajanja kompozita; mehanički rastavljivi spojevi (vijčani) te mehanički nerastavljivi (ljepljenje). Oba procesa spajanja zahtijevaju pažnju te imaju svoje prednosti i nedostatke. Kao primjer, vijčano spajanje kompozitnih laminata ne zahtjeva pripremu površine te je rastavljanje vrlo jednostavno i bez oštećenja. Izrada provrta u kompozitnim konstrukcijama pridonosi velikim koncentracijama naprezanja također. Također, povećanja je masa same konstrukcije zbog upotrebe metalnih vijčanih spojeva. Ljepljene kompozitne konstrukcije imaju manju masu ali zahtijevaju specijalnu pripremu površine koja se lijepi.

Tehnika ljepljena objedinjuje adheziju i sidrenje samog ljepila na površinu te njegovo skrućivanje. Površine visoke koncentracije naprezanja su najčešća mjesta iniciranja pukotine u vijčano spojenim laminatima. Izrada provrta u kompozitnim konstrukcijama kako bi se omogućio vijčani spoj, uvelike pridonosi smanjenu mehaničkih svojstava same konstrukcije. Razlog je tome, što kompozitni materijali slabo prenose opterećenja na veliku površinu zbog svoje anizotropnosti. Kako bi se izbjegla delaminacija i propagacija same pukotine duž konstrukcije, potrebno je ojačati vezu među samim slojevima/laminatima. Ovdje do izražaja dolazi tehnologija šivanja tzv. „suhih“ slojeva prije impregnacije u laminat/konstrukciju.

Glavni cilj ovoga rada je istražiti djelovanje „suhog“ šivanja slojeva kompozitnog laminata na mehanička svojstva, prije svega, sprječavanje propagacije pukotine duž konstrukcije uslijed opterećenja. Ojačanje među slojevima ostvareno je šivanjem polietilenskim koncem čime je onemogućeno širenje pukotine i raslojavanja među slojevima kompozita što povećava životni vijek trajanja konstrukcije.

Ojačanja moraju biti tako dizajnirana kako bi se opirala poprečnim vlačnim silama koje djeluju na laminat. Pri tome, potrebno je uzeti u obzir da ista mogu narušiti sama mehanička svojstva konstrukcije. Pod time se podrazumjevaju tkzv. „džepovi smole“ koji se mogu stvoriti na mjestima ojačanja uslijed impregniranja

ako je tijekom šivanja slojeva došlo do razdvajanja teksture tkanine. Takovi džepovi mogu postati koncentratori naprezanja i dovesti do pojava pukotina.

5. Mehanička svojstva kompozitnih laminata

Uvod

Mehanička svojstva kompozitnih laminata daleko ovise prije svega o svojstvima materijala matrice i ojačala. Međutim vrlo bitnu ulogu u mehaničkim svojstvima kompozitnog laminata odigrati će i proizvodan postupak kojim je taj laminat izrađen. Tako npr., laminat laminiran u otvorenom kalupu *Wet Lay-up/Hand Lay-up* tehnologijom daleko će imati slabija svojstva od laminata laminiranog *Vacuum Bagging* tehnologijom. Razlog tome prije svega leži u uključcima zraka koji se javljaju skrućivanjem matrice oko ojačala gdje nije moguće ostvariti potpunu impregnaciju i adheziju među matricom i ojačalom bez djelovana vakuum-a. Vakuum pospješuje kapilarno popunjavanje prostora između vlaknima ojačala te prijanjanje matrice uz ojačalo čime se postiže visoka čvrstoća kompozitnog laminata. Mehanička svojstva ovise i o „čistoći tehnologije“ tj. o uključcima prljavština i vlage koji se prilikom izrade laminata mogu pojaviti u kompozitu te koji kasnije mogu narušiti mehanička svojstva.

Jedan od danas najvažnijih problema koji se tiču mehaničkih svojstava kompozita jesu pojava pukotina i njihova propagacija duž slojeva kompozita. Ovaj problem također ovisi o već spomenutim svojstvima materijala i tehnologiji izrade, međutim on je jedan od onih koje je nemoguće predvidjeti. Pojava pukotine u kompozitnim materijalima svakodnevno je problem koji se javlja u eksploataciji. Dobar proračun konstrukcije, odabir materijala i tehnologije te vrhunska izrada konstrukcije, nemogu biti siguran faktor u eksploataciji takove konstrukcije. Kompozitni materijali su specifični te i njihova sama upotreba dio je rizika koji inženjeri moraju prihvatiti prilikom eksploatacije konstrukcija.

Već duže vrijeme, inženjeri pokušavaju pronaći načine da zaustave propagiranje pukotina duž kompozitnih konstrukcija. Jednako tako pokušavaju pronaći način da ojačaju djelove konstrukcija na kojim bi se iste mogle pojaviti. Jedan od načina kojemu se posvećuje sve veća pažnja je „Composite laminate stitching“ iliti šivanje „suhih“ kompozitnih slojeva prije samog impregniranja matricom. Šivanjem slojeva kompozita želi se u eksploataciji onemogućiti pukotini daljnje širenje kroz konstrukciju te spriječiti sam lom konstrukcije. Pod time se razumijeva

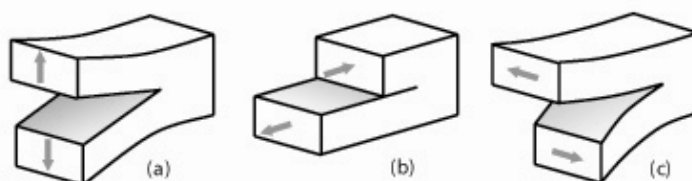
sprječavanje raslojavanja kompozitne konstrukcije pogotovo usljed cikličkog promjenjivog opterećenja u eksploataciji.

Mezomehanička svojstva

Kako je već poznato da kompozitni materijali imaju anizotropna svojstva i nisu homogeni materijali, teško je predvidjeti njihovo ponašanje u eksploataciji. Također, njihovi kriteriji popuštanja (pojava pukotine, širenje pukotine, lom...) bitno su drugačiji i nemogu se prikazati klasičnim pristupom kao krhki ili duktilni lom. Samim time što se radi o spajanju često velikog broja slojeva (i do nekoliko stotina), a niti jedan sloj nije homogen, jasno je da se popuštanje može dogoditi na vrlo različite načine. Najčešće pri ponašanju kompozita razmatraju se: lom matrice, lom ojačala, izvlačenje ojačala te raslojavanje (delaminacija). Danas postoji vrlo velik broj kriterija popuštanja kojima se uglavnom bavi poseban dio Mehanike, mezomehanika. Ono što se može a i primjenjuje se kao praktičan uvid u moguće ponašanje kompozita u eksploataciji jest Mehanika loma koja proučava razvoj pukotine, njezino nastajanje, širenje te lom. U vidu toga se provode eksperimentalni pokusi.

Mehanika loma

Prema mehanici loma, širenje iliti propagacija pukotine može se javiti u 3 slučaja; Modus I (otvaranje), Modus II (smicanje) i Modus III (kidanje) ili u međusobnoj kombinaciji (Slika 19.). U slučaju izotropnih materijala razmatra se samo Modus I.



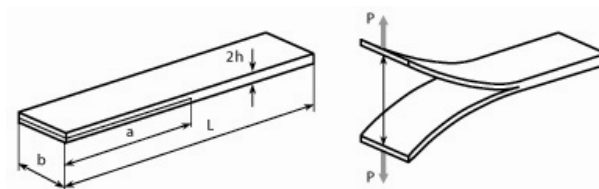
Slika 24 Propagiranje pukotine a) Modus I, b) Modus II, c) Modus III [2]

Propagacija delaminacije (raslojavanja) u kompozitnim laminatima leži među slojevima laminata. U tom pogledu, propagacija delaminacije moguća je po svima trima modelima. Kao primjer, ako delaminacija propagira duž sloja te nailazi na otpor u obliku poprečnog ojačanja (šivani slojevi) pukotina je prisiljena odstupanju i promjeni smjera te je ujedno i usporena. S time je model širenja pukotine

promijenjen. Uglavnom, propagacija delaminacije pukotine kompozita proučava se po modelu I, u rijetkim slučajevima po modusu II i kombinaciji modusu I i II. Modus III u kompozitima je beznačajan te se ne proučava.

Modus I test

Zvan još i DCB (double cantilever beam) test. Ova metoda koristi kompozitnu gredu sa iniciranom pukotinom po ASTM D 5528-01 standardu (Slika 20.). Inicirana pukotina je prisiljena propagaciji djelovanjem vlačnih sila na krajevima greda. Tako, obje grede opterećene odmićući se jedna od druge pospješuju propagaciju pukotine duž kompozitnog laminata.



Slika 25 DCB uzorak po ASTM D 5528-01 standardu [2]

Generalno, uzorci su izrađeni na način da su na polovici svoje dužine odvojeni polovičnim brojem ukupnog broja slojeva kako bi se stvorila inicirana pukotina. To se omogućava umetanjem tanke aluminijske trake prilikom impregniranja. Traka mora biti tanka iz razloga da se na mjestu iniciranja pukotine ne stvore „džepovi smole“. Prilikom ispitivanja kako bi se lomna žilavost što bolje mjerila, mora se uzeti u obzir da su testovi kao što su DCB test **podložni velikim izvijanjima uzoraka**.

6. Izrada uzoraka i ispitivanje

Specifikacije

Standard ispitivanja uzoraka: ASTM D 5528-01 (Modus I Test)

Proizvodna tehnologija izrade uzoraka: Vacuum Bagging (vakuumiranje)

Specifikacija vakuum pumpe: 150 mbar (85% vakuum)

Tip i materijal matrice uzoraka: Epoksidna smola (proizvođač NOVA)

Tip i materijal ojačala: E-glass stakleno vlakno (proizvođač Kelteks)

Tip tkanja materijala ojačala: Keper (eng. TWILL) 200g/m² (eng. TWILL)

Materijal konca za šivanje slojeva: Poliester

Materijal za odvajanje slojeva: Aluminijska traka 20μm

Materijal zglobnog prihvata u čeljusti kidalice (pante): Čelik

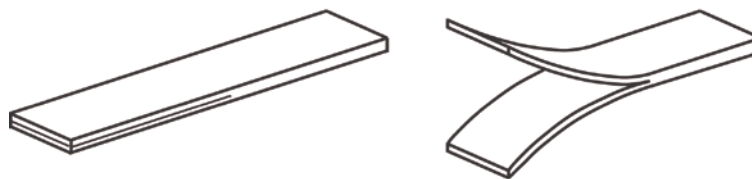
Broj slojeva tkanine: 10

Broj uzoraka: 5 konvencionalno impregniranih + 5 impregniranih sa prethodnim šivanjem slojeva

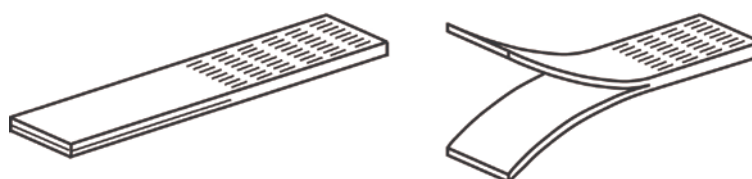
Dimenzije uzoraka su: 100 x 30 x 2,5

- šivanje uzoraka je uzdužno strojno, razmak šavova je 5mm, razmak uboda 2.5mm
- ljepilo za lepljenje zglobnog prihvata u čeljusti kidalice (pante) na uzorke je dvokomponentno na bazi epoksidne smole.

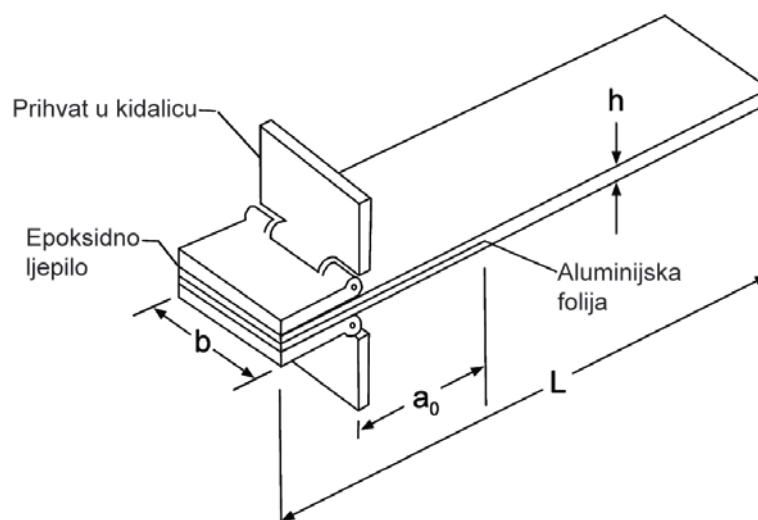
U nastavku su prikazane skice uzoraka za eksperimentalno ispitivanje.



Slika 26 Skica uzoraka bez šivanja slojeva [2]



Slika 27 Skica uzoraka sa prethodnim uzdužnim šivanjem slojeva [2]



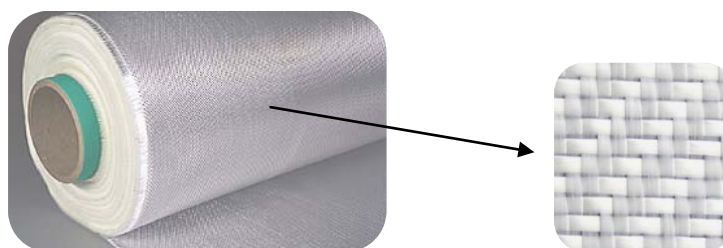
Slika 28 Skica uzorka sa prihvatom u alat kidalice [3]

Priprema i izrada uzoraka

Kako je priprema obje grupe uzoraka jednaka uz dodatno predšivanje tkanine prije impregniranja uzoraka druge grupe, u nastavku je prikazan i opisan proces izrade uzoraka.

1. Rezanje tkanine na mjeru

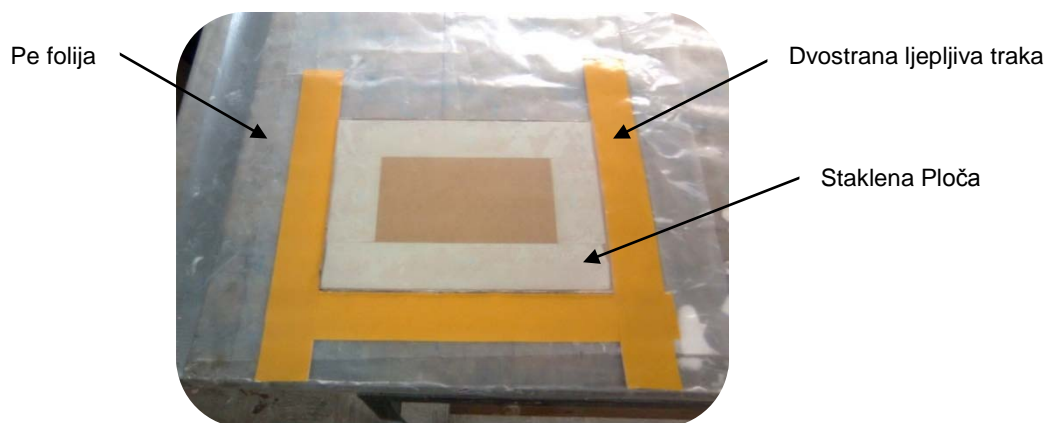
Početak pripreme uzoraka sastoji se od rezanja tkanine na mjeru tj. na 10 jednakih pravokutnih uzoraka za pojedinu grupu. Uzorci tkanine se režu iz bale tkanine koju isporučuje proizvođač. Kao što je prethodno u specifikacijama dano, materijal tkanine je stakleno vlakno tipa keper (eng. TWILL) gustoće 200g/m^2 .



Slika 29 Uzorak tkanine korištene u izradi uzoraka [1]

2. Priprema površine za laminiranje kompozitnog laminata

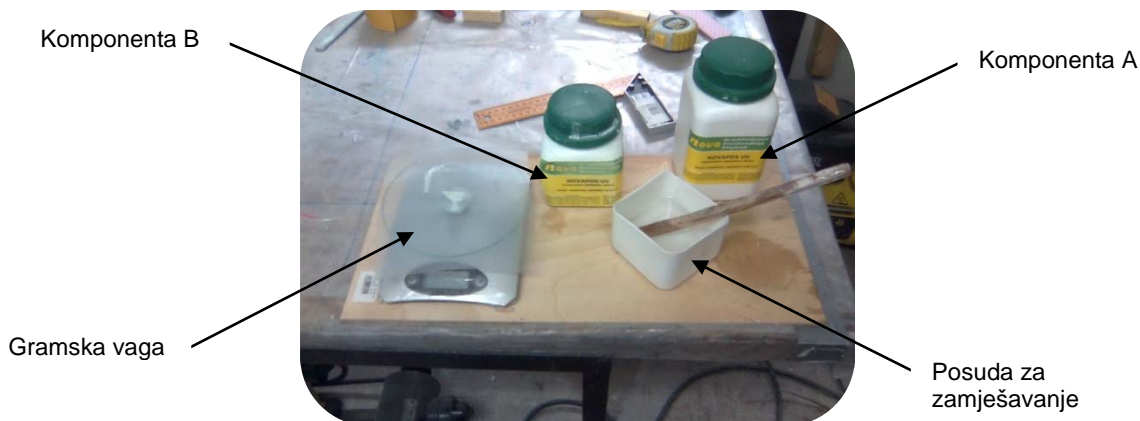
Priprema površine za laminiranje sastoji se od poliranja staklene površine polir pastom. Time se kasnije postiže lakše odvajanje laminata od staklene površine. Staklena površina omogućiti će što ravniju površinu testnih uzoraka. Ispod staklene površine postavljena je PE folija koja će kasnijim zatvaranjem i brtvljenjem dvostrukom ljepljivom trakom omogućiti laminiranje kompozitnog laminata u vakuumu.



Slika 30 Priprema površine za laminiranje uzoraka

3. Mješanje materijala matrice

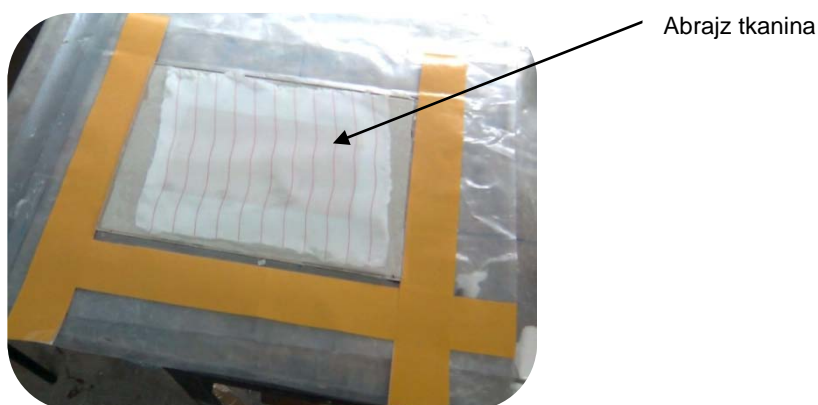
Zamješavanje materijala matrice sastoji se od vaganja i zamješavanja dviju komponenata (A i B) dvokomponentne epoksidne smole NOVAPOX UV. Komponente se mješaju u omjeru $A:B = 2:1$. Potrebno pripaziti kod aganja komponenata i dobro ih umješati.



Slika 31 Vaganje i zamješavanje smole

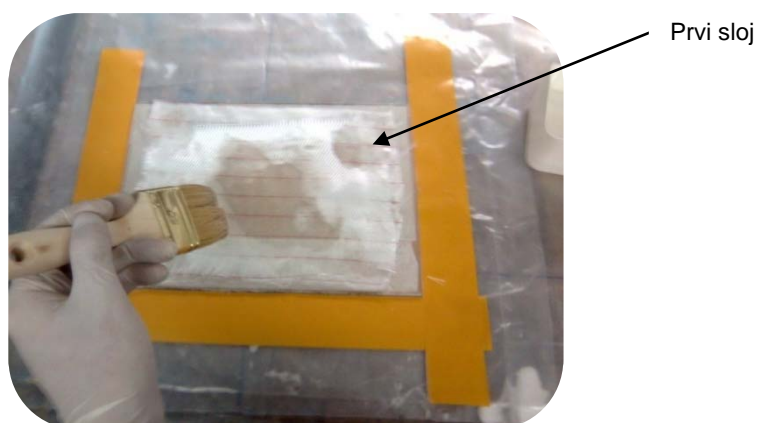
4. Impregniranje slojeva kompozitnog laminata

Prije samog početka impregniranja, na prethodno pripremljenu staklenu površinu podstavlja se tkzv. Abraz tkanina. Abraz tkanina služi da bi sa nakon skrućivanja matrice laminata njezinim odstranjivanjem (deranje sa površine laminata) dobila reljefna površina za bolje sidrenje ljepila kod ljepljenja nastavaka za prihvat u čeljusti kicalice.



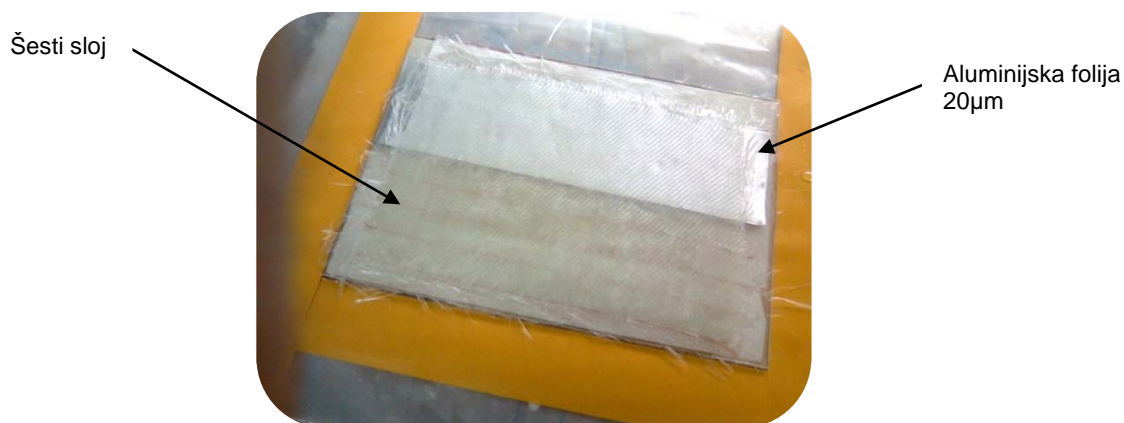
Slika 32 Podstavljanje abraz tkanine

Sljedeći korak je impregniranje jednog po jednog sloja ojačala smolom. Prilikom impregniranja slojeva treba obratiti pažnju da se smola jednoliko i potpuno rasporedi duž cijelog sloja te da se ne stvore „džepovi smole ili zraka“.



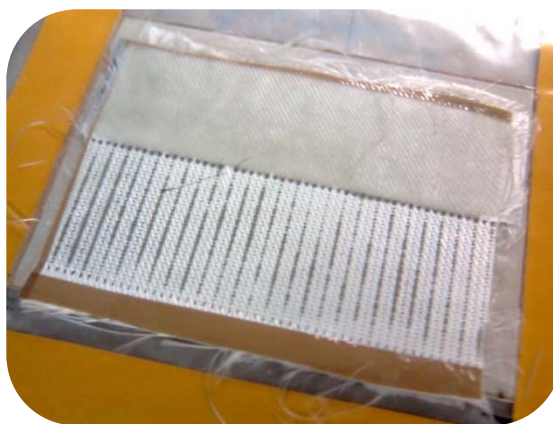
Slika 33 Laminiranje prvog sloja

Nakon impregniranja prvih pet slojeva, potrebno staviti aluminijsku foliju koja će skrućivanjem laminata odvojiti slojeve te time „inicirati“ pukotinu.



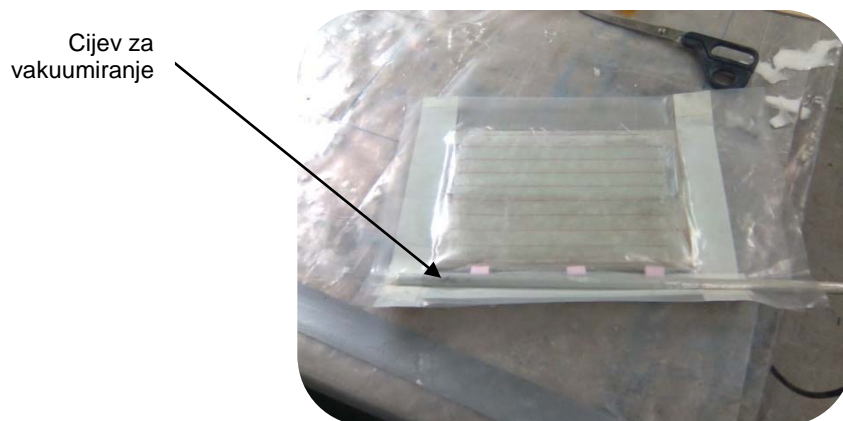
Slika 34 Odvajanje slojeva aluminijskom folijom

Nakon stavljanja aluminijske folije za razdvajanje slojeva, potrebno je impregnirati preostalih pet slojeva. Kod šivane grupe uzoraka prilikom impregniranja potrebno je obratiti veliku pažnju na dio slojeva koji je prošiven. Taj, prošiveni dio, sastoji se od 10 slojeva koji se impregniraju zajedno te ga je potrebno dobro natopiti smolom kako bi smola svojom kapilarnošću podpomognuta vakuumom popunila sav prostor među vlaknima slojeva.



Slika 35 Laminiranje prošivenog dijela slojeva

Nakon impregniranja cijelog laminata, laminat je spreman za zatvaranje u PE foliju brtvljenu dvostrukom ljepljivom trakom te vakuumiranje. Vakuumiranje je podpomognuto cijevi na kojoj su raspoređeni provrti kako bi se što ravnomjernije duž laminata izvlačio zrak vakuum pumpom.



Slika 36 Zatvaranje laminata bez prethodnog šivanja slojeva i vakuumiranje

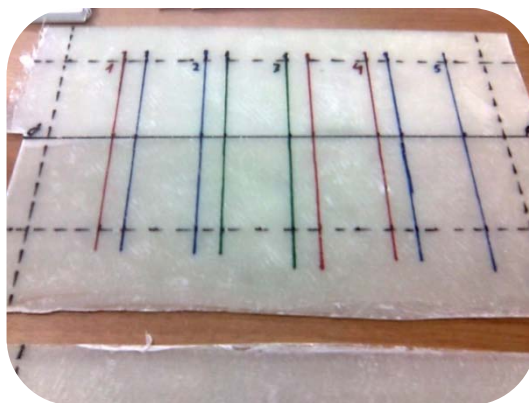


Slika 37 Zatvaranje laminata sa prethodnog šivanim slojevima i vakuumiranje

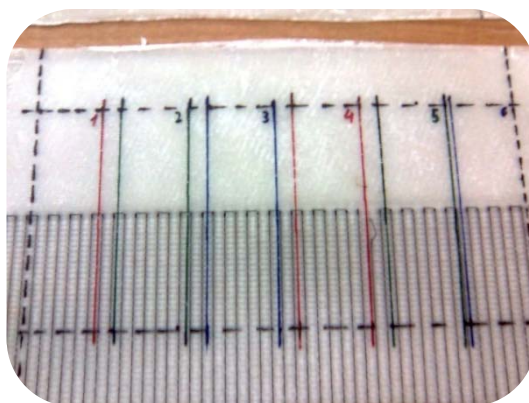


Slika 38 Vakuum pumpa – 150 mbar (85% vakuum)

Nakon skrućivanja laminata u trajanju od 24h. Sa laminata se odstranjuju PE folija te Abrazz tkanina. Abrazz tkaninom osim što se dobila reljefna površina za sidrenje ljepila, njome je i odstranjen višak smole koji se javio na površini laminata. Nakon toga, na laminatu se zacrtavaju dimenzije uzoraka koje će se izrezivati iz istog.

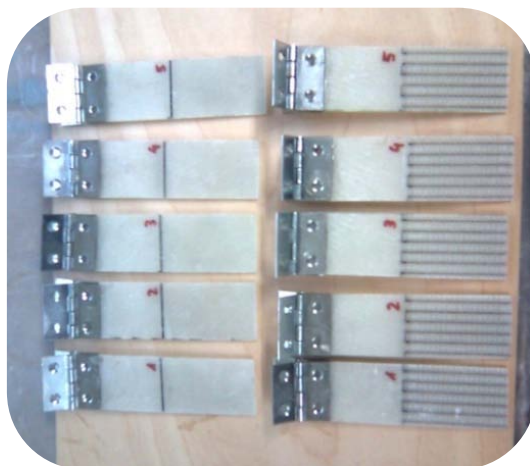


Slika 39 Ocrtavanje uzoraka bez prethodnog šivanja slojeva



Slika 40 Ocrtavanje uzoraka sa prethodnim šivanjem slojeva

Nakon izrezivanja uzoraka, uzorci se obrađuju na potrebne dimenzije. Dužina uzoraka je 150mm, širina uzoraka je 30mm i debljina uzoraka je u prosjeku 2.5mm. Debljina je varijabilna dimenzija pogotovo kod laminata sa šivanim slojevima iz razloga što su već prethodnim šivanjem slojevi tkanine sabijeni i nakon impregniranja i skrućivanja debljina na tom dijelu manja je od debljine laminata iz grupe uzoraka koji nisu prethodno šivani. Nakon obrade uzoraka na mjeru, na uzorke se naljepljuju zglobni prihvat u čeljusti kidalice (panti) koji omogućuju prihvat uzoraka u čeljusti kidalice.



Slika 41 Ljepljenje zglobnog prihvata u čeljusti kidalice

Naljepljivanjem zglobnog prihvata u čeljusti kidalice uzorci su kao takvi spremni za eksperimentalno ispitivanje.

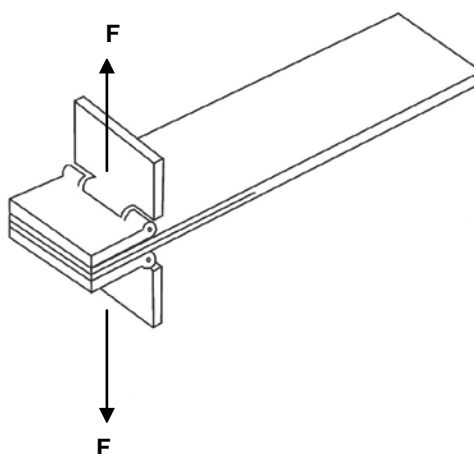
Problemi s izradom uzoraka

Tijekom izrade uzoraka pokazali su se neki od problema. Ono što se pokazalo kao najveći problem kod izrade uzoraka je impregniranje prethodno šivanih slojeva kompozitnog laminata, kod kojih je najveći nedostatak impregniranje smolom jako sabijenih šivanih slojeva. U tom slučaju kapilarna svojstva smole i „*vacuum baging*“ tehnologija nisu dovoljno dobri za potpuno impregniranje šivanog dijela. Kako bi se izbjegao ovaj nedostatak, preporuča se upotreba VARTM tehnologije (Vacuum assisted resin transfer moulding). VARTM tehnologija omogućuje kontinuiranu dobavu smole prilikom vakuumiranja laminata čime bi se zasigurno osiguralo potpunije i ravnomjernije impregniranje šivanog dijela sloja smolom. Drugi nedostatak koji se kasnije mogao pokazati kritičnim u ispitivanju uzoraka je ljepljenje kompozitnih i metalnih dijelova. Naime, na izrađene uzorke kako je već prethodno opisano, ljepljeni su zglobni prihvat u čeljusti kidalice iliti panti dvokomponentnim ljepilom na bazi epoksidne smole. Prije samog ljepljenja površine panti su zabrušeni kako bi se omogućila što bolja adhezijska svojstva spoja te što bolje sidrenje smole i izbjegla moguća odvajanja metalnog i kompozitnog dijela. U prvoj grupi slojeva javio se problem odvajanja aluminijske folije koja je služila kao odvajač slojeva i inicirač pukotine. Naime u toj grupi uzoraka, aluminijska folija nije bila prethodno polirana polir pastom. U drugoj grupi

uzoraka se ispostavilo da je vrlo jednostavno odvajanje folije ukoliko je ona prethodno bila poliranja polir pastom. Također, jedan od nedostataka, bio je i samo rezanje tkanine ojačala na mjeru. Kako se radi o vrlo finom tkanju (200g/m^2) i teksturi tkanine ojačala, prilikom rezanja treba obratiti pažnju na smicanje iste kako bi se što točnije izrezali pravokutni oblici. Uz to, postoji i velika mogućnost rasipanja vlakana iz teksture tkanine na krajevima gdje je ista rezana.

Ispitivanja uzoraka

Eksperimentalna ispitivanja uzoraka obavljena su na statičkoj vlačnoj kidalici u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje po ASTM D 5528-01 standardu. Dimenzije uzoraka su $100 \times 30 \times 2,5\text{mm}$. Broj uzoraka po grupi je 5. Brzina kidanja je 10mm/min . Na slici 38. je skica statičkog vlačnog opterećenja uzorka.



Slika 42 Skica statičkog vlačnog opterećenja uzorka [1]

Izvršeno je 11 mjerenja uzoraka. Prvo mjerenje je bilo probno mjerenje na uzorku E1_N kako bi se ustanovilo ponašanje uzorka u čeljustima kidalice te uspostavila optimalna brzina kidanja uzoraka. Uzorak je naravno bio podvrgnut samo elastičnoj deformaciji u vrlo kratkom trajanju. Početna probna brzina kidanja je bila 2 mm/min nakon čega se ustanovilo da je ista premala i da bi vrijeme ispitivanja bila dugotrajno. Ustanovljeno je da bi brzinu kidanja trebalo povećati te je tako povećana na brzinu od 10 mm/min . Čeljusti su tako vraćanje u „nultu poziciju“ tj. uzorak je rasterećen i nakon toga je počelo drugo mjerenja sa povećanom

brzinom. Uzorci su redom ispitivani te su dobiveni sljedeći rezultati prikazani tablicom (Tablica 6.).

Tabela 6 Rezultati ispitivanja uzoraka

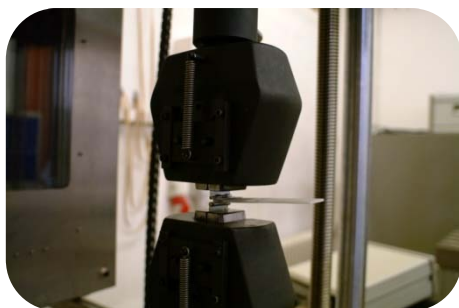
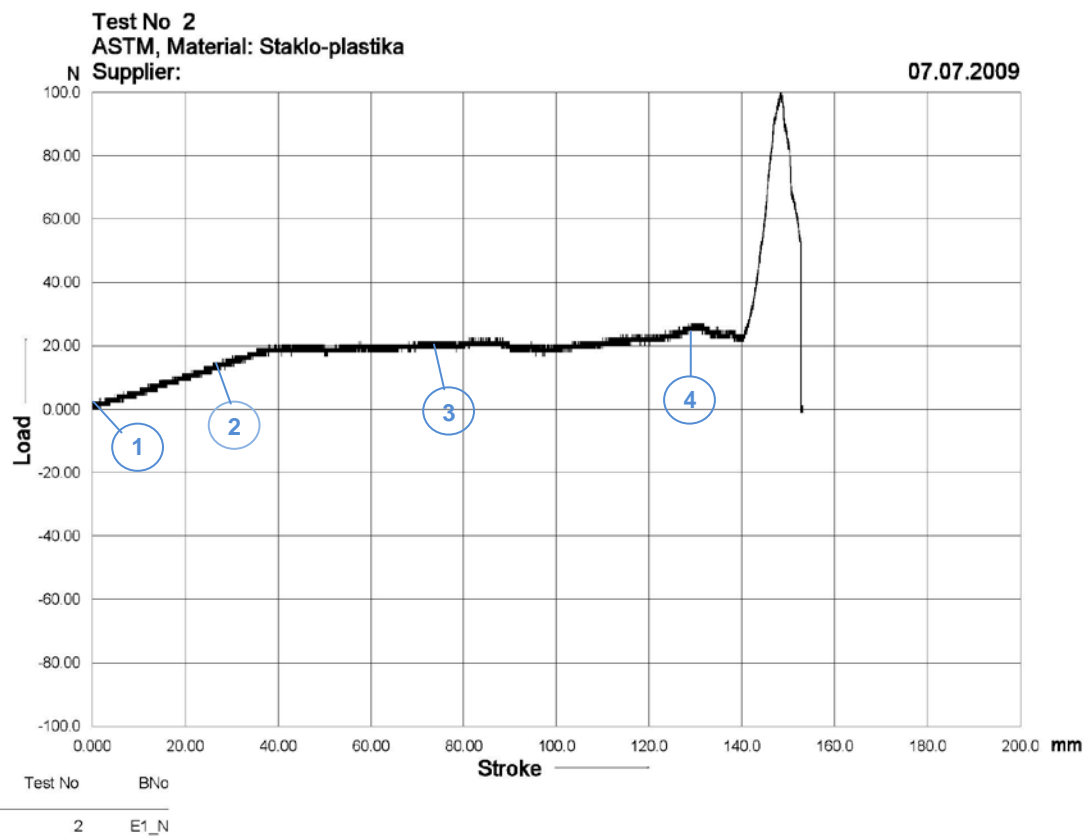
Broj uzorka	Ispitivanje broj	Oznaka Uzorka	Prekidna sila F_p [N]	Produljenje Δp [mm]
1	2	E1_N	98.95	149.14
2	3	E2_N	43.85	134.48
3	4	E3_N	86.60	114.40
4	5	E4_N	32.60	120.33
5	6	E5_N	80.95	136.72
6	7	E1_S	70.85	94.85
7	8	E2_S	140.55	97.45
8	9	E3_S	87.70	95.92
9	10	E4_S	38.25	96.15
10	11	E5_S	130.45	96.05

- uzorci E#_N su konvencionalno ipregnirani
- uzorci E#_S su impregnirani sa predhodnim šivanjem slojeva

Usljed eksperimentalnog ispitivanja otvaranje pukotina na uzorcima je slikano fotografskim aparatom. Slikani su uzorci E1_N iz grupe uzoraka čiji slojevi nisu prethodno šivani i E1_S iz grupe uzoraka čiji su slojevi prethodno šivani. Na uzorku E1_N vidljiv je početak djelovanja vlačnih sila na uzorak (1) – (3) te početak otvaranja pukotine (4). Slike uzoraka E1_S, (1) – (4) prikazuju djelovanje vlačnih sila na uozrak, međutim do otvaranja pukotine nije došlo što je vidljivo (4). Prilikom ispitivanja, uzorci su bili podložni savijanju što je također vidljivo na slikama te tijekom ispitivanja nisu održali horizontalni položaj. Kod uzorka E1_S u trenutku (4) došlo je do početka loma materijala uzorka prije otvaranja inicirane pukotine. To je nastupilo kod većine uzoraka sa prethodno šivanim slojevima. Inicirana pukotina kod uzorka E1_N otvarala se normalno dok se kod ostalih uzoraka bez prethodno šivanih slojeva, širila do određenog trenutka kada su se također javila velika savojna opterećenja te je nastupio lom materijala i pukotine nisu propagirale do kraja uzorka.

U nastavku su priložene slike uzoraka tijekom i nakon i ispitivanja te dijagramski rezultati za svaki uzorak.

Ispitivanje uzorka bez prethodno šivanih slojeva [E1_N]



(1)



(2)

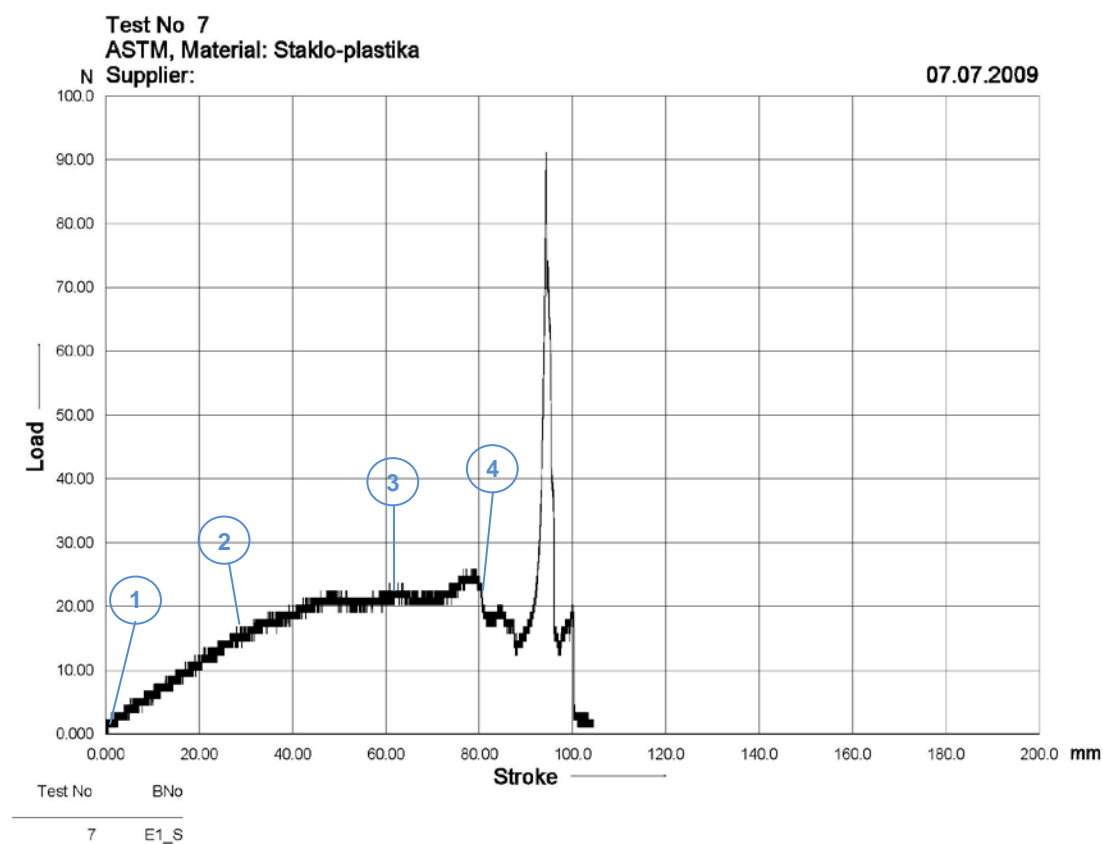


(3)



(4)

Ispitivanje uzorka sa prethodno šivanim slojevima [E1_S]



(1)



(2)

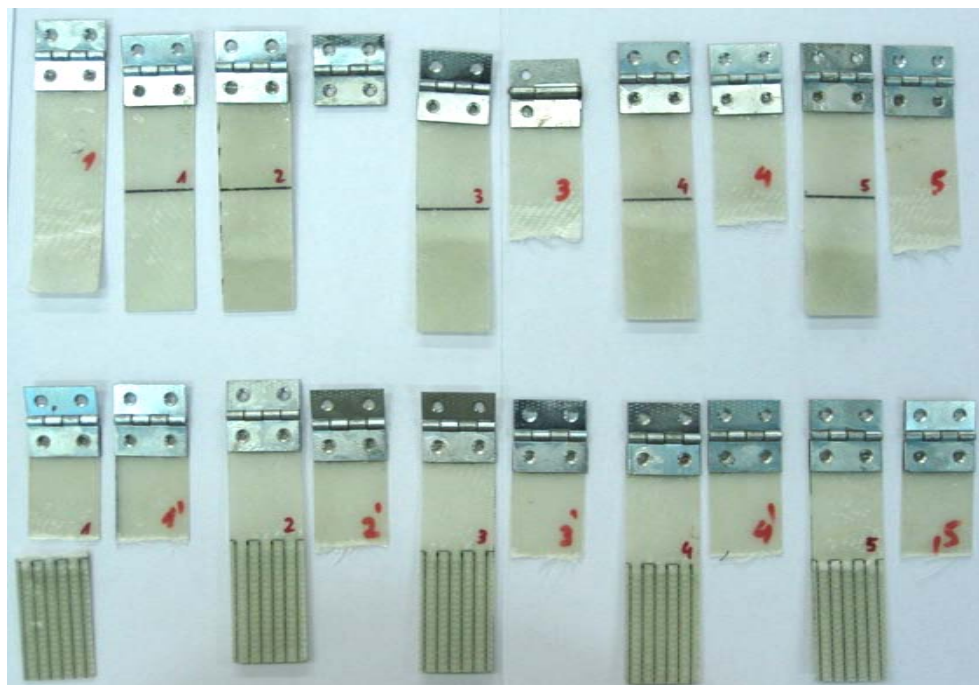


(3)

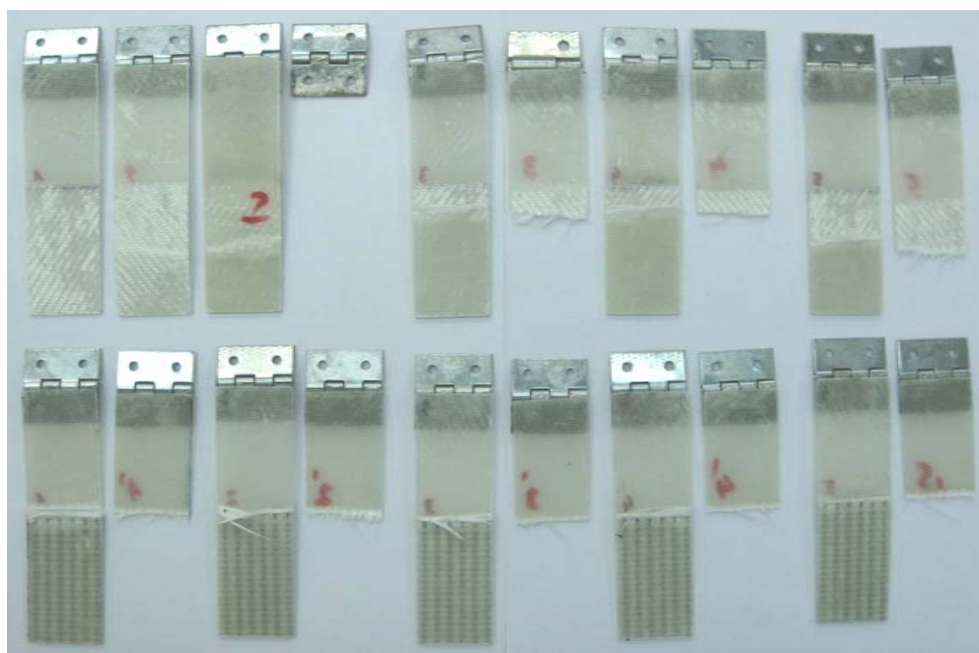


(4)

Izgled uzoraka nakon ispitivanja



Slika 43 Uzorci nakon ispitivanja (prednja strana)



Slika 44 Uzorci nakon ispitivanja (stražnja strana)

7. Zaključak

Ispitivanja uzoraka datih dimenzija po ASTM D 5528-01 standardu pokazali su da je za manje (tanje) dimenzije uzoraka test nije pouzdan tj. takovi uzorci su podložni savijanju. Ova pretpostavka je dana na osnovu ispitivanja konvencionalno impregniranih uzoraka tj. uzoraka koji nisu ni na koji način nisu dodatno ojačani (vijčani spojevi, ojačanja šivanjem i sl.). Kako je već ranije opisano, svi uzorci prilikom ispitivanja doživjeli su velika savojna opterećenja te nisu tijekom ispitivanja ostali u u horizontalnom položaju. Ono što je zasigurno jedan od najbitnijih zaključaka za provedena ispitivanja jest da je čvrstoća spoja tj. interlaminarna čvrstoća (ILSS) puno veća od same čvrstoće i krutosti materijala uzorka (kompozitnog laminata) što je rezultiralo velikim savijanjem uzoraka i pucanjem materijala prije otvaranja pukotine za uzorke sa prethodno šivanim slojevima. Na temelju ispitivanja uzoraka i daljnjeg istraživanja zaključak je da dimenzije uzoraka nebi smjele puno odstupati od sljedećih: 125 mm dužine uzorka, 20-25 mm širine uzorka i 3-5 mm debljine uzorka. Ispitivanje je dakako pokazalo da kompozitni laminati sa prethodno šivanim slojevima imaju daleko veću interlaminarnu čvrstoću od konvencionalno impregniranih kompozitnih laminata, jer tehnologija šivanja slojeva prije impregnacije nije dozvolila otvaranje inicirane pukotine.

8. Literatura

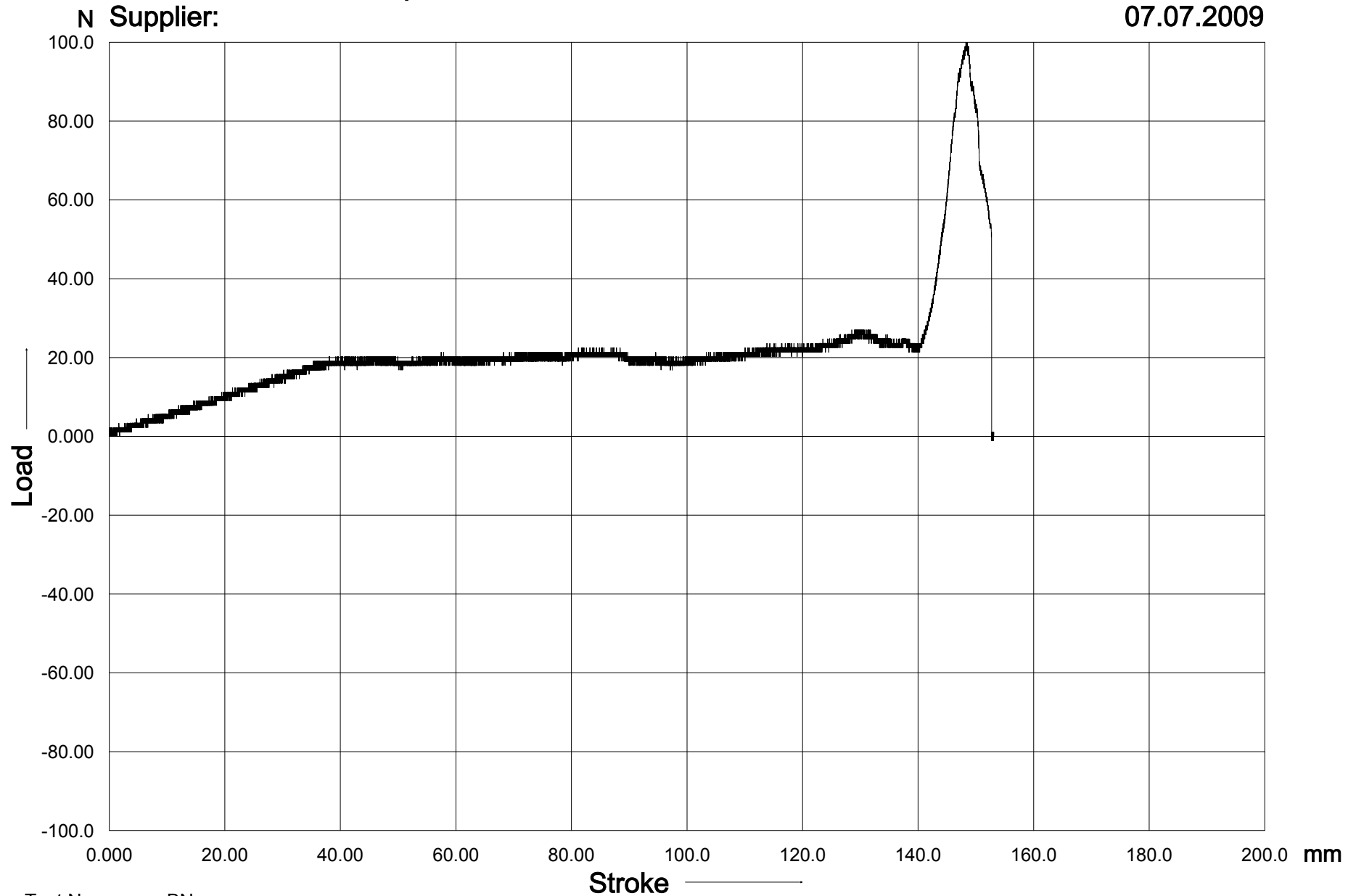
- [1] SP Systems – Guide to Composites (<http://www.gurit.com/>)

- [2] Variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions: testing & analysis - Universitat de Girona Escola Politècnica Superior Dpt. d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

- [3] Numerical and experimental analyses of the delamination of cross-ply laminates - University of West Bohemia in Pilsen, Department of Mechanics

Test No 2
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

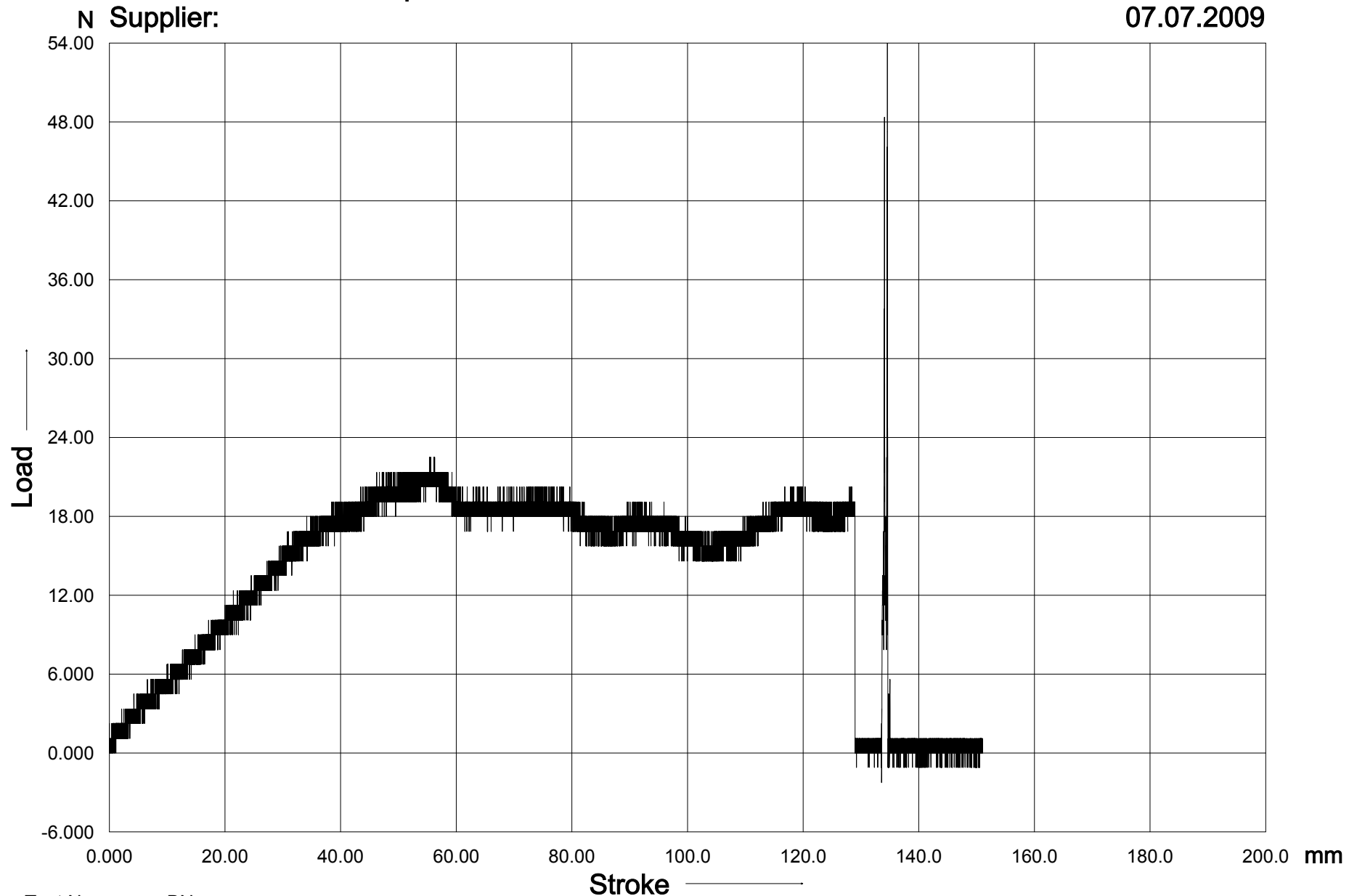
07.07.2009



Test No	BNo
2	E1_N

Test No 3
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

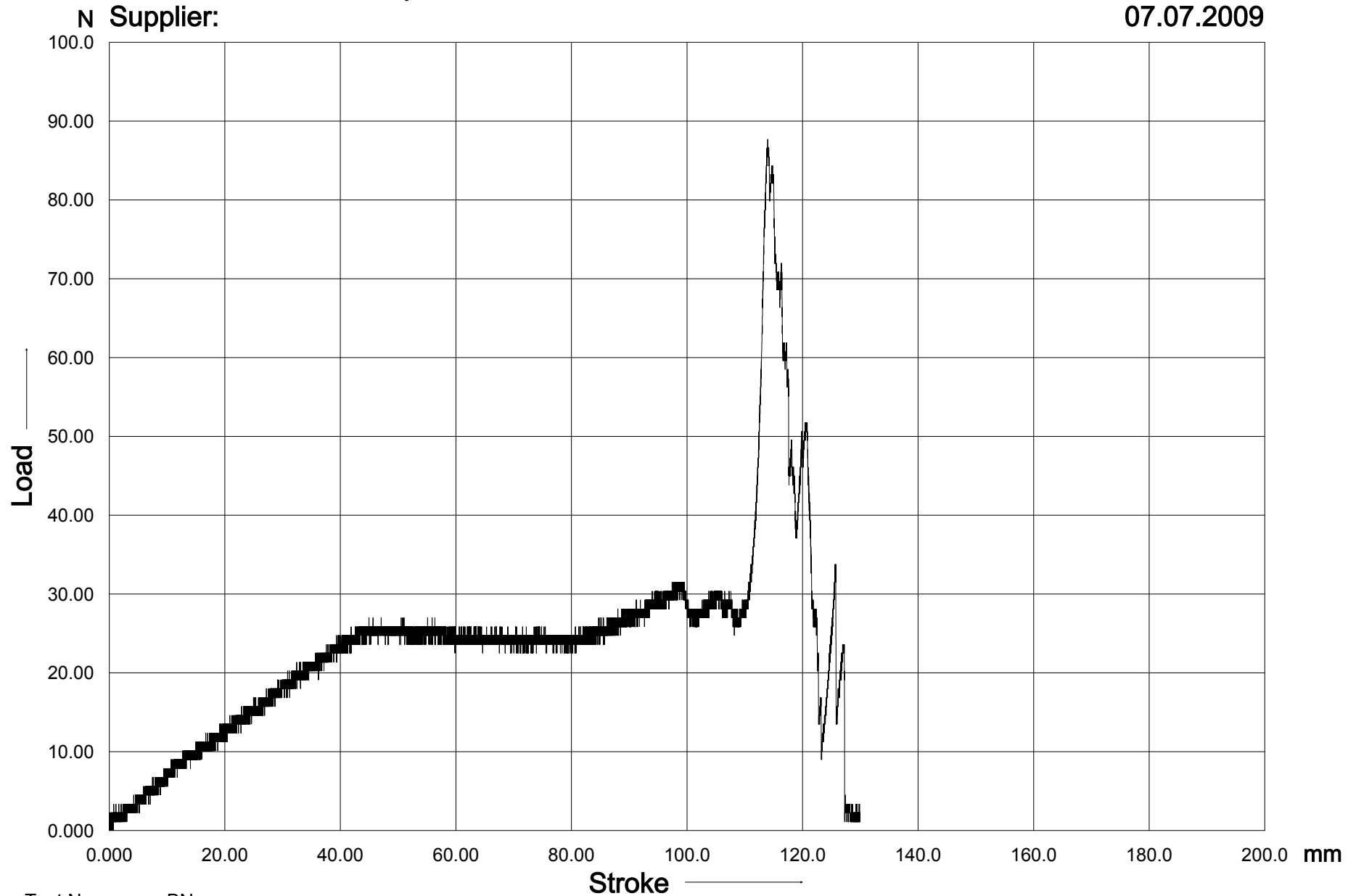


Test No BNo

3 E2_N

Test No 4
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

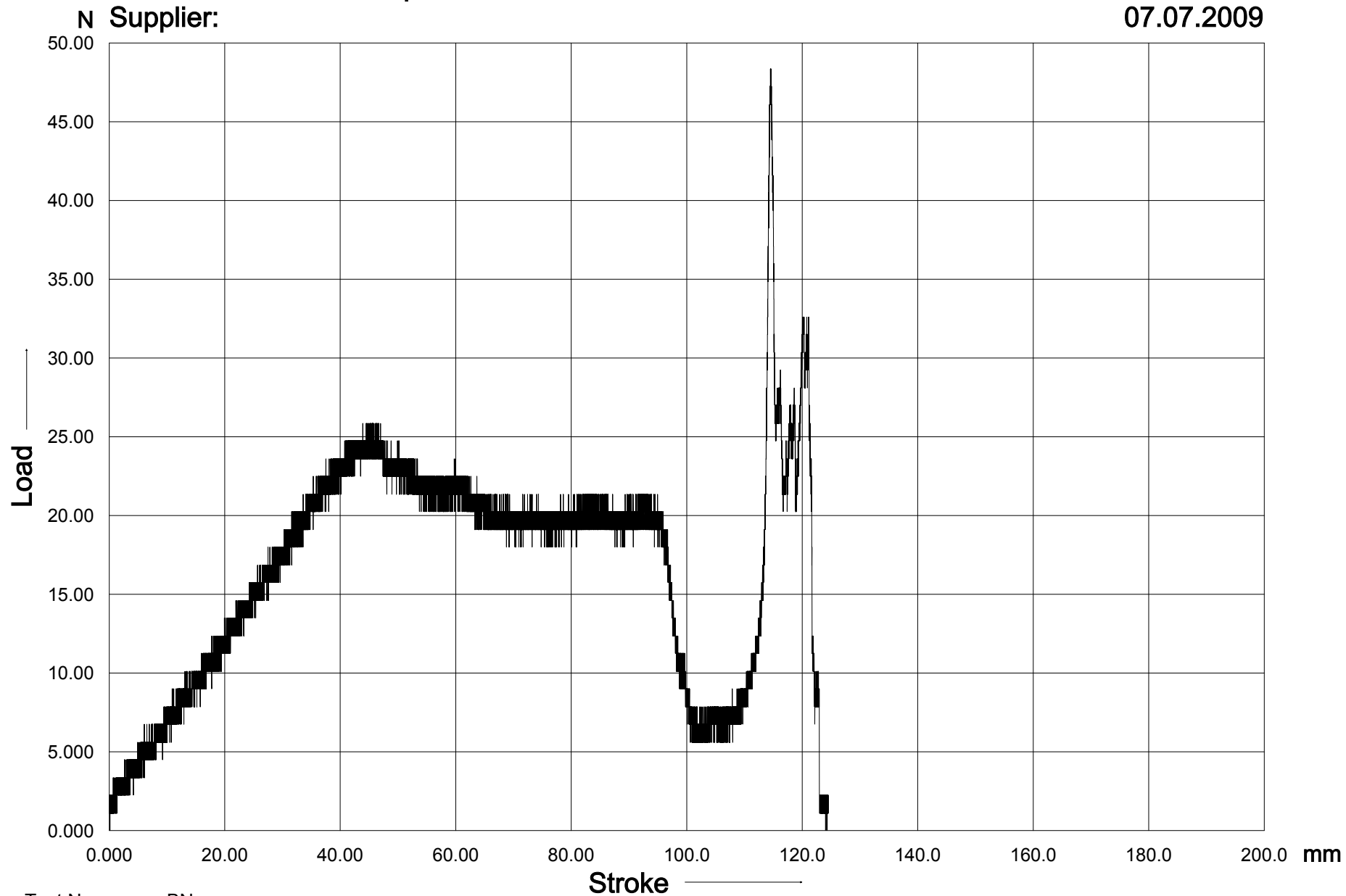


Test No BNo

4 E3_N

Test No 5
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

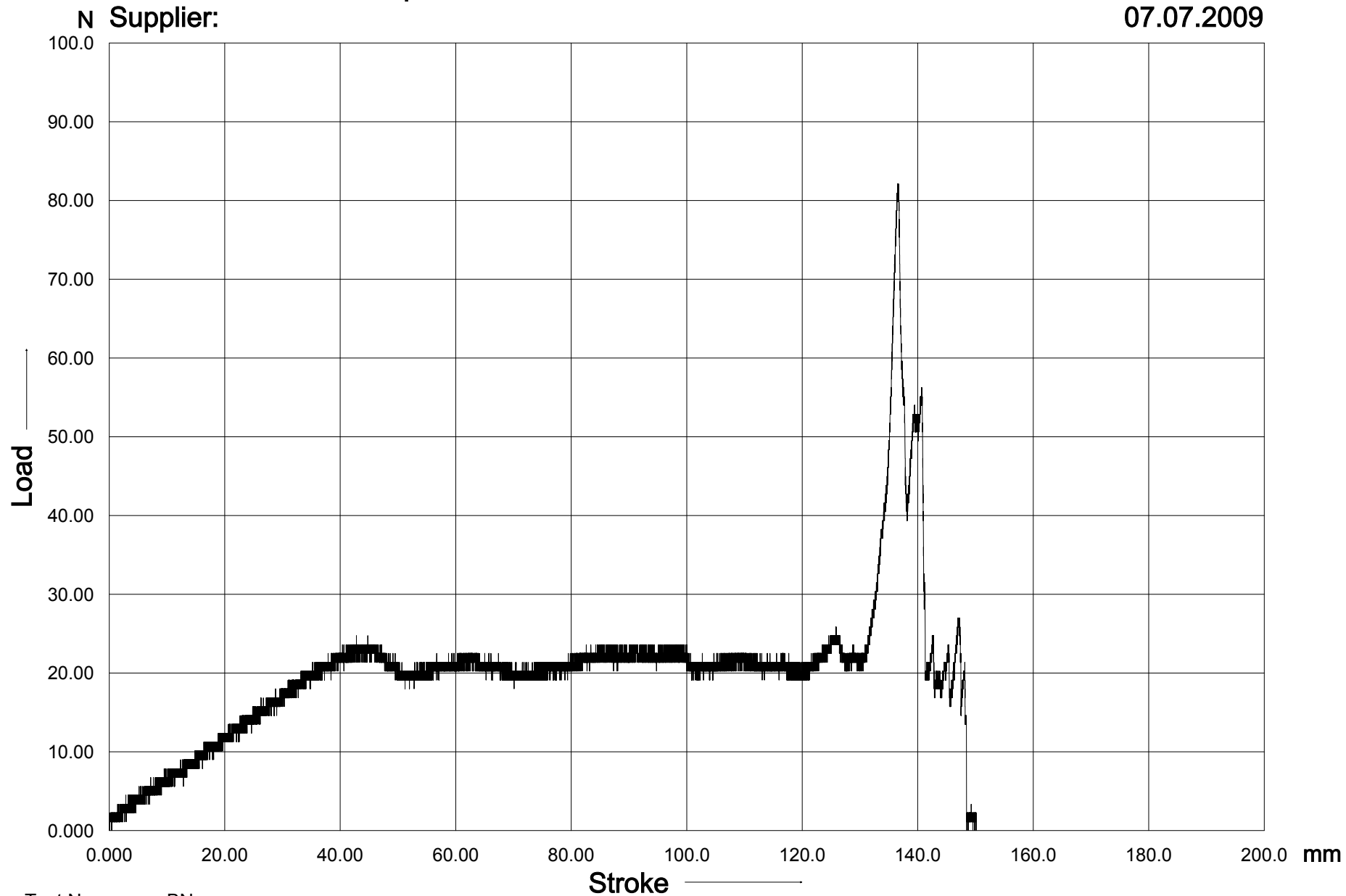


Test No BNo

5 E4_N

Test No 6
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009



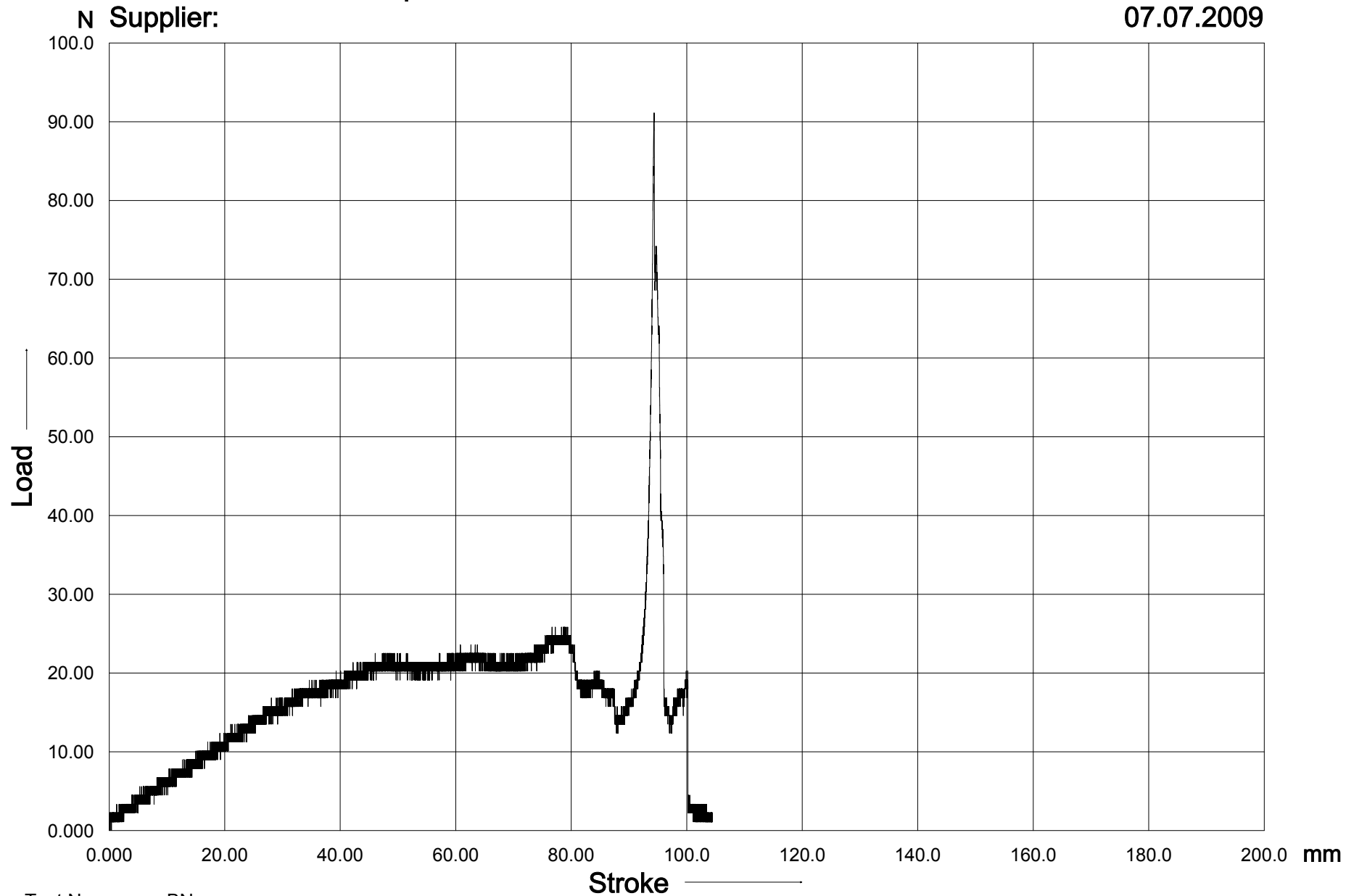
Test No BNo

6

E5_N

Test No 7
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

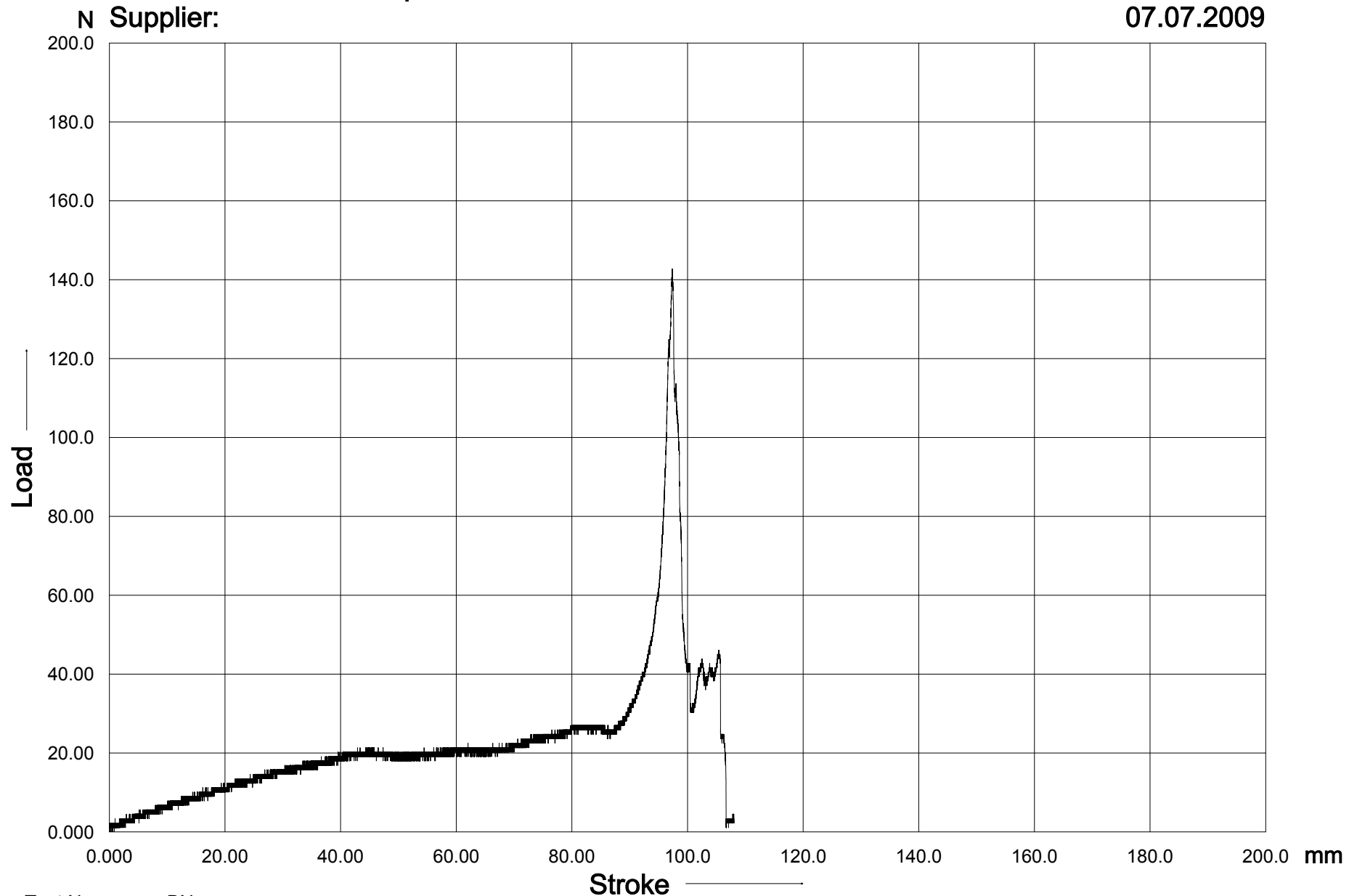


Test No BNo

7 E1_S

Test No 8
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

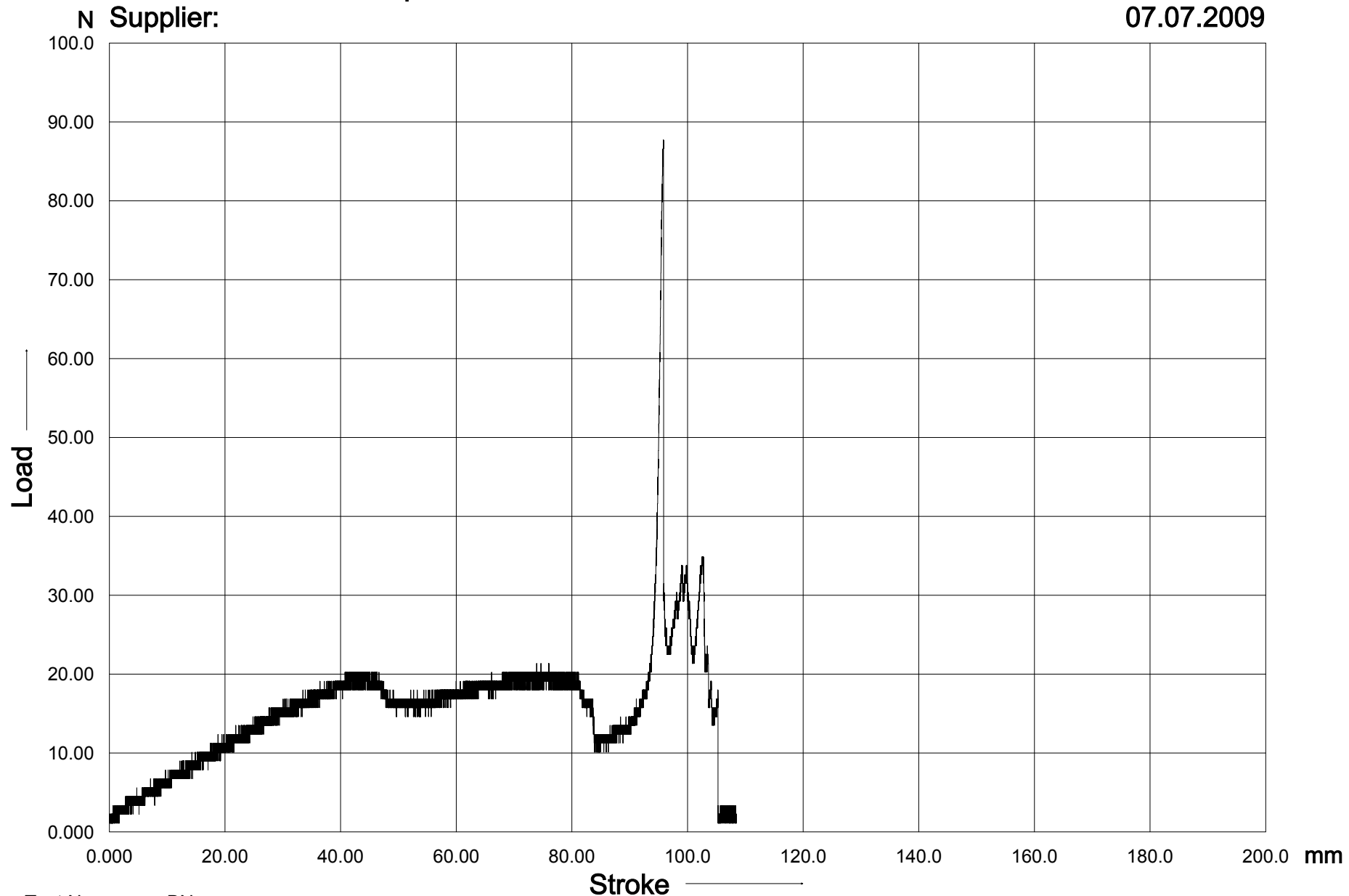


Test No BNo

8 E2_S

Test No 9
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

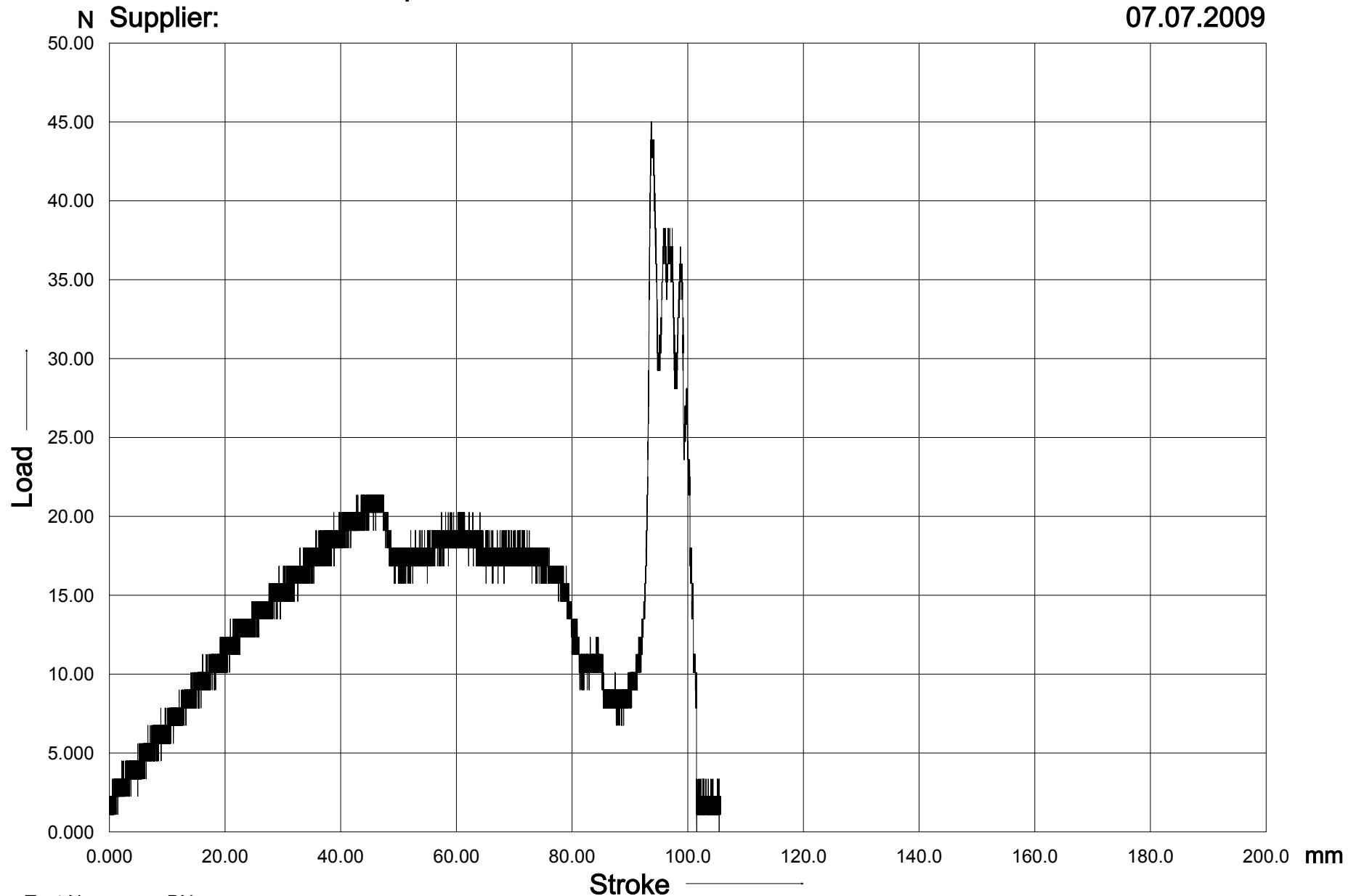


Test No BNo

9 E3_S

Test No 10
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009

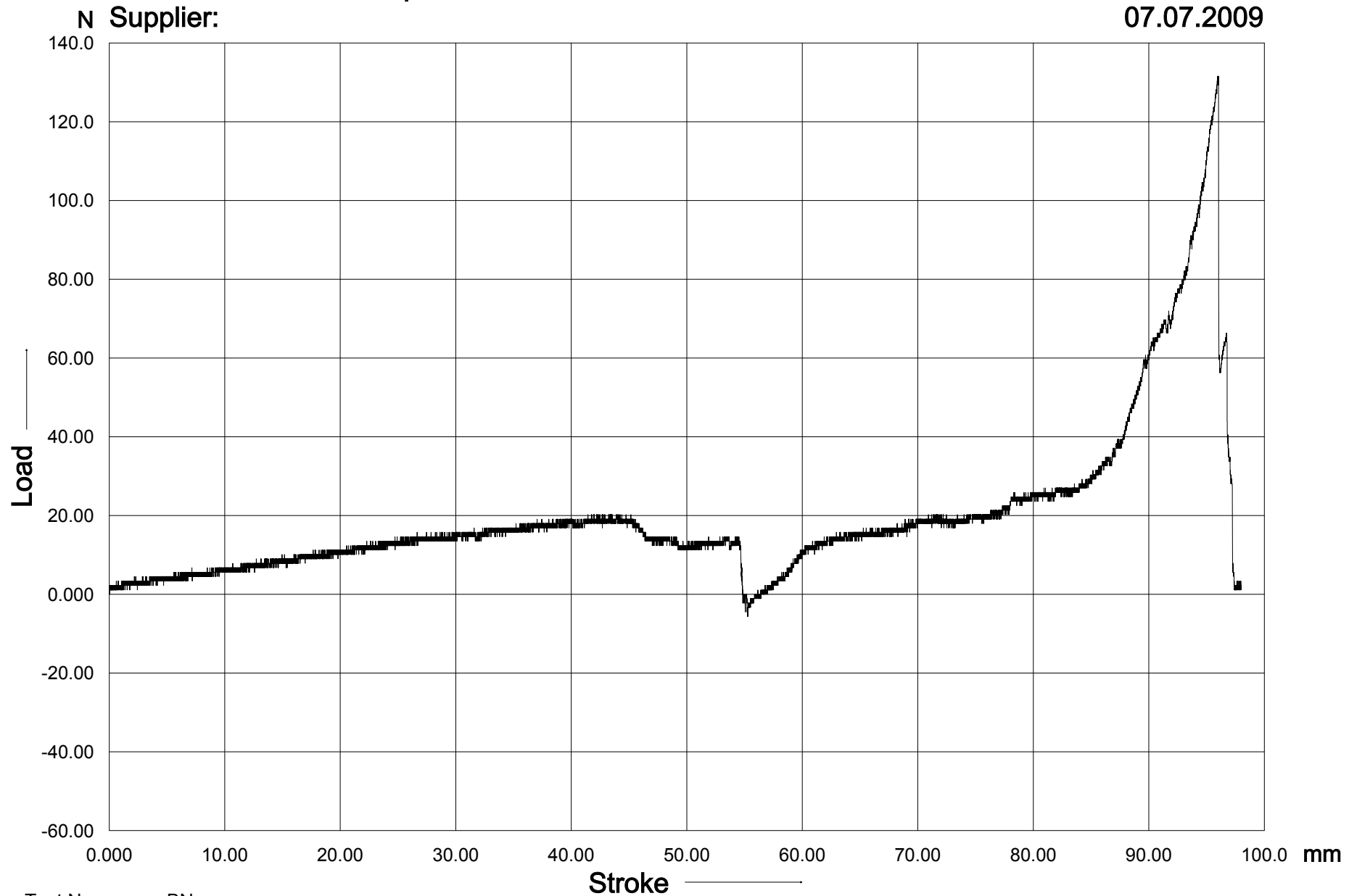


Test No BNo

10 E4_S

Test No 11
ASTM, Material: Staklo-plastika
Supplier:

07.07.2009



Test No

BNo

Supplier:

07.07.2009

